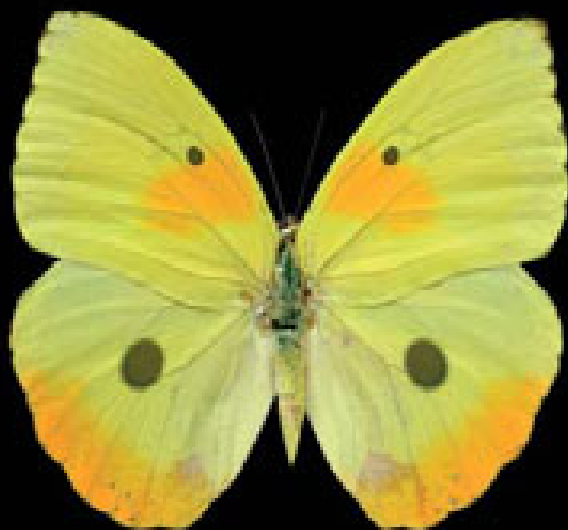


50

ideias física

que precisa mesmo de saber



Joanne Baker

Índice

Introdução 3

MATÉRIA EM MOVIMENTO

- 01 O princípio de Mach 4
- 02 As leis do movimento de Newton 8
- 03 As leis de Kepler 12
- 04 A lei da gravitação de Newton 16
- 05 A conservação da energia 20
- 06 O movimento harmónico simples 24
- 07 A lei de Hooke 28
- 08 A lei dos gases ideais 32
- 09 A segunda lei da termodinâmica 36
- 10 O zero absoluto 40
- 11 O movimento browniano 44
- 12 A teoria do caos 48
- 13 A equação de Bernoulli 52

DEBAIXO DAS ONDAS

- 14 A teoria da cor de Newton 56
- 15 O princípio de Huygens 60
- 16 A lei de Snell 64
- 17 A lei de Bragg 68
- 18 A difracção de Fraunhofer 72
- 19 O efeito de Doppler 76
- 20 A lei de Ohm 80
- 21 A regra da mão direita de Fleming 84
- 22 As equações de Maxwell 88

ENIGMAS QUÂNTICOS

- 23 A lei de Planck 92
- 24 O efeito fotoeléctrico 96
- 25 A equação das ondas de Schrödinger 100

- 26 O princípio da incerteza de Heisenberg 104
- 27 A interpretação de Copenhaga 108
- 28 O gato de Schrödinger 112
- 29 O paradoxo EPR 116
- 30 O princípio de exclusão de Pauli 120
- 31 Supercondutividade 124

PARTINDO ÁTOMOS

- 32 O átomo de Rutherford 128
- 33 Antimatéria 132
- 34 Fissão nuclear 136
- 35 Fusão nuclear 140
- 36 O modelo padrão 144
- 37 Diagramas de Feynman 148
- 38 A partícula de Deus 152
- 39 A teoria das cordas 156

ESPAÇO E TEMPO

- 40 A relatividade restrita 160
- 41 A relatividade geral 164
- 42 Buracos negros 168
- 43 O paradoxo de Olbers 172
- 44 A lei de Hubble 176
- 45 O *big bang* 180
- 46 A inflação cósmica 184
- 47 Matéria escura 188
- 48 A constante cosmológica 192
- 49 O paradoxo de Fermi 196
- 50 O princípio antrópico 200

Glossário 204

Índice remissivo 206

Introdução

Quando contei aos meus amigos que ia fazer este livro eles brincaram comigo e disseram-me que a primeira coisa que se tem mesmo de saber acerca da física é que é difícil. Apesar disso, todos nós usamos a física no dia-a-dia. Quando olhamos para um espelho, ou pomos um par de óculos, estamos a usar a física da óptica. Quando regulamos o despertador dos nossos relógios, estamos a seguir o tempo; quando nos orientamos por um mapa, estamos a navegar no espaço geométrico. Os nossos telemóveis ligam-nos através de fios electromagnéticos invisíveis a satélites que orbitam por cima das nossas cabeças. Mas a física não diz só respeito à tecnologia. Sem ela não haveria lua, nem arco-íris nem diamantes. Até o sangue que flui nas nossas artérias segue as leis da física, a ciência do mundo físico.

A física moderna é cheia de surpresas. A física quântica virou o nosso mundo às avessas ao questionar até o próprio conceito da existência de um objecto. A cosmologia pergunta o que é o universo. Como é que surgiu e porque é que estamos aqui? O universo é especial ou é de alguma forma inevitável? Ao espreitarem para dentro dos átomos, os físicos descobriram um mundo fantasmagórico de partículas fundamentais. Até a mesa de mogno mais sólida é feita sobretudo de espaço vazio, os seus átomos sendo escorados por andaimes de forças nucleares. A física nasceu da filosofia, e de certa forma está a virar-se para ela outra vez, ao providenciar visões do mundo que são novas e inesperadas por transcenderem as nossas experiências diárias.

E no entanto a física não se resume a um conjunto de ideias imaginativas. Ela tem as suas raízes em factos e em experiências. O método científico está continuamente a actualizar as leis da física, como sucede com o *software* dos computadores, quando os erros são corrigidos e novos módulos acrescentados. Se as evidências o exigirem, são permitidas grandes mudanças na forma de pensar, mas a aceitação demora tempo. A ideia de Copérnico de que a Terra gira em torno do Sol demorou mais de uma geração a ser aceite pela maioria das pessoas, mas o passo acelerou e a física quântica e a relatividade foram integradas na física passada uma década. De forma que até as mais bem-sucedidas leis da física estão constantemente a ser testadas.

Este livro oferece-vos um passeio rápido pelo mundo da física, desde conceitos básicos como gravidade, luz e energia até às ideias modernas da teoria quântica, do caos e da energia escura. Espero que, tal como um bom guia turístico, vos tente a irem descobrir mais acerca destes assuntos. A física não é só fundamental – é *divertida*.

01 O princípio de Mach

Uma criança num carrossel é puxada para fora pelas estrelas distantes. Este é o princípio de Mach, de como «a massa ali influencia a inércia aqui». Através da gravidade, os objectos muito distantes afectam a forma como as coisas se movem, e giram, na sua vizinhança. Mas porque é que isto é assim, e como é que se pode dizer se uma coisa se está ou não a mover?

Se já alguma vez estiveram sentados num comboio e viram, através da janela, uma carruagem próxima de vocês a afastar-se, estarão de acordo em como por vezes é difícil dizer se é o vosso comboio que está a partir da estação ou se é o outro que está a chegar. Existe alguma maneira de determinar, com certeza, qual dos dois está em movimento?

Ernst Mach, um filósofo e físico austríaco, debateu-se com esta questão no século XIX. Ele estava a seguir as passadas do grande Isaac Newton, que acreditava, ao contrário de Mach, que o espaço era um cenário absoluto. Tal como o papel em que se desenham gráficos, o espaço de Newton continha um sistema de coordenadas próprio, e ele descrevia todos os movimentos como deslocações relativamente a essa rede de referência. Mach, no entanto, discordava dessa ideia, argumentando que em vez disso o movimento só tinha significado quando observado relativamente a outro objecto, não relativamente à rede. O que é que significa estar a mover-se se não relativamente a qualquer outra coisa? Neste sentido, Mach, que foi influenciado pelas ideias mais antigas do rival de Newton, Gottfried Leibniz, foi um precursor de Albert Einstein, ao preferir pensar que só os movimentos relativos faziam sentido. Mach argumentou que, visto que

Cronologia

c. 335 A.C.

Aristóteles afirma que os objectos se movem devido à acção de forças

1640 D.C.

Galileu formula o princípio da inércia

“O Espaço absoluto, pela sua própria natureza, não tendo qualquer referência a nada de externo, permanece sempre homogéneo e imóvel.”

Isaac Newton, 1687

uma bola rola da mesma forma quer esteja na França ou na Austrália, a rede do espaço é irrelevante. A única coisa que poderia, eventualmente, afectar a forma como a bola rola, seria a gravidade. Na Lua a bola poderia muito bem rolar de forma diferente porque a força gravitacional que está a atrair a massa da bola é mais fraca lá. Como todos os objectos do universo exercem uma força gravitacional uns sobre os outros, cada objecto irá sentir a presença dos outros através das suas atracções mútuas. De forma que o movimento irá, em última análise, depender da distribuição da matéria, ou da sua massa, e não das propriedades do espaço em si.

Massa O que é ao certo a massa? É uma medida de quanta matéria tem um objecto. A massa de um bloco de metal será igual à soma das massas de todos os átomos que o compõem. A massa é subtilmente diferente do peso. O peso é uma medida da força de gravidade que está a puxar um corpo para baixo – um astronauta pesa menos na Lua do que na Terra porque a força gravitacional exercida pela Lua, mais pequena, é menor. Mas a massa do astronauta é a mesma – o número de átomos que ele contém não mudou. De acordo com Albert Einstein, que mostrou que a energia e a massa são intercambiáveis, a massa pode ser convertida em energia pura. De forma que a massa é, em última análise, energia.

Inércia A inércia, que provém da palavra latina para «preguiça», é muito parecida com a massa, mas diz-nos o quão difícil é mover um objecto ao aplicar-lhe uma força. Um objecto com uma inércia muito grande resiste ao movimento. Mesmo no espaço, mover um objecto com uma massa muito grande precisa que se aplique uma força muito grande. Um asteroide rochoso gigante numa rota de colisão com a Terra pode precisar de um empurrão enorme para ser desviado, empurrão esse que pode ser criado por uma explosão nuclear ou por uma força mais pequena aplicada durante um intervalo de tempo mais longo. Uma nave mais pequena, com menos inércia do que o asteroide, pode ser manobrada facilmente com pequenos motores a jacto.

1687

Newton publica o seu argumento do balde

1893

Mach publica *A Ciência da Mecânica*

1905

Einstein publica a teoria da relatividade restrita

O astrónomo italiano Galileu Galilei propôs o princípio da inércia no século XVII; se deixamos um objecto tranquilo, e não aplicamos nenhuma força sobre ele, então o seu estado de movimento não se altera. Se se está a mover, continua a mover-se com a mesma velocidade e na mesma direcção. Se está parado, continua parado. Newton refinou esta ideia e tornou-a na sua primeira lei do movimento.

O balde de Newton Newton também desvendou a gravidade. Ele viu que as massas se atraíam entre si. Uma maçã cai duma árvore para o chão porque é atraída pela massa da Terra. Da mesma forma, a Terra é atraída pela massa da maçã, mas seria muitíssimo difícil conseguir medir a deslocação microscópica da Terra inteira em direcção à maçã.

Newton provou que a intensidade da gravidade decresce rapidamente com a distância, de forma que a força gravitacional da Terra é muito mais fraca se estivermos a flutuar a uma grande altitude do que se estivermos na sua superfície. Mas mesmo assim continuaríamos a sentir a atracção da Terra, ainda que enfraquecida. Quanto mais nos afastássemos mais fraca ela se tornaria, mas continuaria a poder alterar o nosso movimento. De facto, todos os objectos do universo podem exercer uma atracção gravitacional minúscula que poderá afectar de forma muito subtil o nosso movimento.

Newton tentou compreender as relações entre os objectos e o movimento pensando num balde com água a girar. No início, quando o balde se começa a mover, a água fica parada, embora as paredes do balde já se estejam a mexer. Depois a água também começa a rodar. A sua superfície desce à medida que o líquido tenta escapar subindo pelos lados, mas o balde continua a mantê-lo lá dentro. Newton argumentou que a rotação da água só poderia ser entendida se vista no referencial fixo do espaço absoluto, contra a sua rede. Para dizermos que o balde estava a rodar nós só precisaríamos de olhar para ele, porque poderíamos ver as forças que estavam a actuar e a produzir a superfície côncava da água.

Séculos mais tarde, Mach revisitou este argumento. E se o balde cheio de água fosse a única coisa no universo? Como é que vocês poderiam saber que era o balde que se estava a mover? Não se poderia igualmente dizer que era a água que se estava a mover relativamente ao balde? A única forma de isto fazer sentido seria colocar outro objecto no universo do balde, digamos as paredes de um quarto, ou até uma estrela distante. Então o balde estaria claramente a rodar relativamente a esse objecto. Mas sem a referência de um quarto estacionário, ou das estrelas fixas, quem poderia afirmar que era o balde, ou a água, que estava a rodar? Nós passamos pela mesma experiência quando vemos o Sol e as estrelas a atravessarem o céu. São as estrelas ou é a Terra que está a rodar? Como é que sabemos? De acordo com Mach, e com Leibniz, o movimento requer objectos como referência externa para que o possamos compreender, e por

ERNST MACH 1838–1916

Para lá do princípio de Mach, o físico austríaco Ernst Mach é lembrado pelos seus trabalhos em óptica e em acústica, na fisiologia da percepção sensorial, na filosofia da ciência e sobretudo pelas suas pesquisas acerca das velocidades supersónicas. Ele publicou um artigo muito importante em 1877 que descrevia a forma segundo a qual um projectil a mover-se mais rápido do que a velocidade do som produz uma onda de choque, parecida com o rasto de um navio. É esta onda de choque no ar que causa o estrondo sónico dos aviões supersónicos. À razão da velocidade do projectil, ou avião a jacto, pela velocidade do som, chama-se agora o número de Mach, de forma que Mach 2 indica uma velocidade igual a duas vezes a velocidade do som.

consequente a inércia, como conceito, não tem significado num universo que só tem um objecto. De forma que se o universo não tivesse estrelas nenhuma, nunca saberíamos que a Terra estava a girar. As estrelas dizem-nos que estamos a rodar relativamente a elas.

As ideias de movimento relativo *versus* movimento absoluto expressas no princípio de Mach inspiraram muitos físicos desde que surgiram, especialmente Einstein (que foi quem de facto criou a expressão «princípio de Mach»). Einstein tomou a ideia de que todo o movimento é relativo para construir as suas teorias da relatividade, a restrita e a geral. Ele também resolveu um dos problemas principais das ideias de Mach: a rotação e a aceleração deveriam criar forças extra, mas onde é que elas estavam? Einstein mostrou que, se tudo no universo estivesse a rodar relativamente à Terra, nós iríamos de facto sentir uma pequena força que faria com que o planeta balouçasse de uma forma bem específica.

A natureza do espaço tem intrigado cientistas durante milénios. Os físicos de partículas de hoje em dia acreditam que o espaço é um caldeirão borbulhante de partículas subatómicas a serem continuamente criadas e destruídas. A massa, a inércia, as forças e o movimento podem bem acabar por ser manifestações de uma sopa quântica fervilhante.

a ideia resumida
A massa é importante para o movimento

02 As leis do movimento de Newton

Isaac Newton foi um dos mais eminentes, conflituosos e influentes cientistas de todos os tempos. Ele ajudou a inventar o cálculo, explicou a gravidade e identificou as cores que constituem a luz branca. As suas três leis do movimento descrevem porque é que uma bola de golfe segue uma trajectória curva, porque é que nos sentimos atirados para o lado de um carro ao descrever uma curva e porque é que sentimos uma força através de um taco de baseball quando ele atinge a bola.

Embora no tempo de Newton ainda não tivessem inventado as motocicletas, as suas três leis do movimento explicam como é que um acrobata de moto do circo consegue subir o Poço da Morte vertical, e como é que os ciclistas olímpicos conseguem pedalar em pistas inclinadas.

Newton, que viveu no século XVII, é considerado um dos maiores intelectos da ciência. Foi necessário o seu carácter imensamente inquisitivo para se poderem compreender alguns dos aspectos mais aparentemente simples, e mais fundamentais, do nosso mundo, como por exemplo porque é que ao atirmos uma bola ela faz uma curva através do ar, porque é que as coisas caem para baixo em vez de caírem para cima e como é que os planetas se movem em torno do Sol.

Estudante médio de Cambridge na década de 1660, Newton começou por ler os grandes trabalhos dos matemáticos. Através deles, foi afastado das leis civis e atraído para as leis físicas. E foi então que, em licença sabática em casa devido a uma epidemia de peste que encerrou a universidade, Newton deu os primeiros passos para desenvolver as suas três leis do movimento.

Cronologia

c. 350 A.C.

Aristóteles propõe, na sua *Física*, que os movimentos são devidos a mudanças contínuas

1640 D.C.

Galileu formula o seu princípio da inércia

As Leis do Movimento de Newton

Primeira Lei Corpos movem-se em linha recta com uma velocidade uniforme, ou permanecem estacionários, a menos que uma força actue para alterar a sua velocidade ou direcção.

Segunda Lei Forças produzem acelerações que estão em proporção com a massa de um corpo ($F = ma$).

Terceira Lei Qualquer acção de uma força produz uma reacção de valor igual e sentido oposto.

Forças Tomando de empréstimo o princípio da inércia de Galileu, Newton formulou a sua primeira lei. Ela afirma que os corpos não se movem, ou não mudam a sua velocidade, a não ser que uma força actue sobre eles. Os corpos que não se estão a mover irão continuar parados a não ser que seja aplicada uma força; corpos que se estejam a mover a uma velocidade constante irão continuar a mover-se exactamente à mesma velocidade a não ser que sejam actuados por uma força. Uma força (por exemplo, um empurrão) fornece uma aceleração que modifica a velocidade do objecto. A aceleração é uma mudança da velocidade ao longo do tempo.

É difícil dar-mos conta disto nas nossas experiências do dia a dia. Quando lançamos um disco de hóquei ele desliza ao longo do gelo mas vai acabar por parar, devido à fricção com o gelo. A fricção causa uma força que desacelera o disco. Mas a primeira lei de Newton pode ser vista num caso especial em que não há fricção. O mais parecido com isto seria ir para o espaço, mas mesmo aí existem forças, como a gravidade, a actuar. Mesmo assim, a primeira lei fornece uma pedra basilar graças à qual conseguimos perceber forças e movimento.

Aceleração A segunda lei do movimento de Newton relaciona o tamanho da força com a aceleração que ela produz. A força necessária para acelerar um objecto é proporcional à massa do objecto. Objectos pesados – ou melhor, objectos com inércia grande – precisam de mais

1687

Newton publica os
Principia

1905

Einstein publica a teoria da
relatividade restrita

força para serem acelerados do que objectos mais leves. De forma que para acelerar um carro e ele demorar um minuto desde o repouso até atingir 100 quilómetros por hora seria necessária uma força igual à massa do carro vezes o aumento da sua velocidade por unidade de tempo. A segunda lei de Newton é expressa de forma algébrica como « $F = ma$ », força (F) igual à massa (m) vezes a aceleração (a). Invertendo esta definição, uma outra forma de exprimir a segunda lei diz que a aceleração é igual à força por unidade de massa. Para uma aceleração constante, a força por unidade de massa também não se altera. De forma que a mesma quantidade de força é necessária para mover um quilograma de massa, quer ele faça parte de um corpo grande ou de um corpo pequeno. Isto explica a experiência imaginária de Galileu, em que ele perguntou qual corpo atingiria o chão primeiro, se largados da mesma altura: uma bala de canhão ou uma pena? À primeira vista poderíamos pensar que a bala de canhão chegaria antes da pena. Mas isto é só devido à resistência do ar, que trava a pena. Se não houvesse ar, ambas cairiam exactamente da mesma forma, chegando ao chão ao mesmo tempo. Ambas sentem a mesma aceleração, devida à gravidade, de forma que caem lado a lado. Os astronautas da Apollo 15 mostraram em 1971 que, na Lua, onde não há atmosfera para a travar, a pena cai à mesma velocidade que o martelo, bem pesado, de um geólogo.

Acção igual a reacção A terceira lei de Newton afirma que qualquer força aplicada a um corpo produz nesse corpo uma força de reacção de valor igual mas sentido oposto. Por outras palavras, para toda a acção existe uma reacção. A força oposta é sentida como sendo um recuo. Se uma patinadora empurrar outra, ela também vai mover-se para trás à medida que empurra o corpo da sua companheira. Um atirador sente o coice da espingarda no seu ombro quando dispara. A força de recuo tem uma intensidade igual à força que se exprimiu originalmente, como o empurrão ou a bala. Nos filmes de crimes, a vítima de um tiroteio é frequentemente empurrada para trás pela força da bala. Isto é enganador. Se a força fosse realmente tão grande, o atirador também seria atirado para trás pelo recuo da sua arma. Até quando nós saltamos para cima exercemos uma pequena força sobre a Terra dirigida para baixo, mas como a Terra tem uma massa muitíssimo superior à nossa é impossível dar por essa força.

Com estas três leis, mais a gravidade, Newton conseguiu explicar o movimento de quase todos os objectos, desde avelãs em queda até às balas disparadas por um canhão. Armado com estas três equações, poderia ter subido para cima de uma motocicleta, se tal coisa tivesse existido nos seus dias, e atacado o Poço da Morte com toda a confiança. Quanta confiança devem depositar nas leis de Newton? A primeira lei diz que a mota e o seu condutor querem continuar a andar numa dada direcção a uma certa velocidade. Mas para fazer com que a mota ande em círculos, de acordo com a segunda lei, é preciso aplicar uma força para a manter confinada e fazer com que mude constantemente de direcção, neste caso a força aplicada pela pista através das rodas. A força necessária é igual à massa da mota e do condutor multiplicada pela sua aceleração.

ISAAC NEWTON 1643–1727

Isaac Newton foi o primeiro cientista a ser ordenado cavaleiro na Grã-Bretanha. Apesar de ser «preguiçoso» e «distraído» na escola, e um estudante nada notável na Universidade de Cambridge, Newton desabrochou de repente, quando a peste negra forçou o encerramento da universidade no Verão de 1665. Regressando à sua casa em Lincolnshire, Newton dedicou-se à matemática, à física e à astronomia, e desenvolveu até os fundamentos do cálculo. Foi lá que produziu versões iniciais das suas três leis do movimento e deduziu a lei do inverso do quadrado para a gravidade. Após esta notável torrente de ideias, Newton foi eleito para a Cadeira Lucasiana de Matemática em 1669, com apenas 27 anos de idade. Virando a sua atenção para a óptica, Newton descobriu com um prisma que a luz branca

era feita das cores do arco-íris, tendo grandes discussões com Robert Hooke e Christiaan Huygens acerca deste assunto que se tornaram legendárias. As duas principais obras escritas por Newton foram os *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, ou *Principia*, e o *Opticks*. Numa fase já avançada da sua carreira, Newton começou a tornar-se activo em política. Defendeu a liberdade académica quando o Rei James II tentou interferir nas nomeações para a universidade e entrou para o Parlamento em 1689. Um personagem contraditório, por um lado desejando atenção e por outro muito reservado e tentando evitar críticas, Newton usou o poder da sua posição para lutar amargamente contra os seus inimigos científicos, continuando a ser uma figura dada a litígios até à sua morte.

A terceira lei explica depois a pressão exercida pela moto sobre a pista, como sendo uma força de reacção que se estabelece. É esta pressão que cola o condutor e a moto à parede inclinada, e se a moto tiver velocidade suficiente ela poderá até andar numa parede vertical.

Mesmo hoje em dia, o conhecimento das leis de Newton é tudo aquilo que têm de saber para descreverem as forças envolvidas quando vocês vão muito depressa de carro numa curva ou até, cruz-credo, quando têm um acidente. Só para coisas que se estão a mover muito próximo da velocidade da luz, ou que tenham massas muitíssimo pequenas, é que as leis de Newton deixam de funcionar. É nestes extremos que a relatividade de Einstein e a ciência da mecânica quântica passam a dominar.

a ideia resumida

O movimento explicado

03 As leis de Kepler

Johannes Kepler procurava padrões em tudo. Olhando para tabelas astronômicas que descreviam os movimentos periódicos de Marte projectados no céu, ele descobriu três leis que governam as órbitas dos planetas. Kepler descreveu a forma segundo a qual os planetas descrevem órbitas elípticas, e como planetas mais distantes orbitam mais devagar em torno do Sol. As leis de Kepler não só transformaram a astronomia como estabeleceram as fundações para a lei da gravitação de Newton.

“Dei-me conta de repente que aquela pequena ervilha, linda e azul, era a Terra. Levantei o meu polegar e fechei um olho, e o meu polegar tapou por completo o planeta Terra. Não me senti um gigante. Senti-me muito, muito pequeno.”

Quando os planetas se movem em torno do Sol, aqueles que estão mais próximos dele movem-se mais depressa do que os que estão mais longe. Mercúrio gira em torno do Sol em apenas 80 dias terrestres. Se Júpiter viajasse à mesma velocidade, demoraria cerca de 3,5 anos terrestres para completar uma órbita, quando na verdade leva 12. À medida que os planetas passam uns pelos outros, quando vistos da Terra alguns deles parecem andar para trás, visto que o movimento da Terra os ultrapassa. Nos tempos de Kepler estes movimentos «retrógrados» eram um mistério imenso. Foi a resolução deste enigma que deu a Kepler a inspiração de que ele precisava para desenvolver as suas três leis do movimento planetário.

Neil Armstrong, nascido em 1930

Cronologia

c. 580 A.C.

Pitágoras declara que os planetas orbitam em esferas cristalinas perfeitas

c. 150 D.C.

Ptolomeu regista o movimento retrógrado e sugere que os planetas se movem em epiciclos

JOHANNES KEPLER 1571–1630

Johannes Kepler gostava de astronomia desde a mais tenra idade, tendo registado no seu diário um cometa e um eclipse lunar ainda antes de ter dez anos. Durante o período em que ensinou em Graz, Kepler desenvolveu uma teoria da cosmologia que foi publicada no *Mysterium Cosmographicum* (*O Mistério Sagrado do Cosmos*). Mais tarde foi assistente do astrónomo Tycho Brahe no seu observatório nos arredores de Praga, herdando a sua posição como Matemático Imperial em 1601. Lá, Kepler preparou horóscopos para o imperador e analisou as

tabelas astronómicas de Tycho Brahe, publicando as suas teorias de órbitas não-circulares, e a primeira e segunda leis do movimento planetário, no seu *Astronomia Nova* (*Nova Astronomia*). Em 1620, a mãe de Kepler, uma curandeira de ervas, foi presa sob acusação de bruxaria, e só foi libertada devido aos esforços legais de Kepler. Ele conseguiu no entanto continuar o seu trabalho e a terceira lei do movimento planetário foi publicada em *Harmonices Mundi* (*Harmonia dos Mundos*).

Padrão de polígonos O matemático alemão Johannes Kepler procurava padrões na natureza. Ele viveu no final do século XVI e começo do século XVII, uma altura em que a astrologia era levada a sério e a astronomia era uma disciplina da física ainda na sua infância. As ideias religiosas e espirituais eram tão importantes quanto a observação para descobrir as leis da natureza. Kepler era um místico que acreditava que a estrutura fundamental do universo era construída a partir de formas geométricas perfeitas, e devotou a sua vida a tentar adivinhar os padrões de polígonos perfeitos que ele imaginava estarem escondidos nas obras da natureza.

O trabalho de Kepler surgiu um século depois do astrónomo polaco Nicolau Copérnico ter proposto que o Sol estava no centro do universo e que a Terra orbitava em torno do Sol, em vez de ser ao contrário. Antes dessa altura, e desde os trabalhos do filósofo grego Ptolomeu, acreditava-se que o Sol e as estrelas orbitavam em torno da Terra, levados por esferas sólidas de cristal. Copérnico não se atreveu a publicar a sua ideia radical durante a sua vida, deixando que colegas seus o fizessem pouco antes da sua morte, por medo que entrasse em colisão com a doutrina da Igreja. Ainda assim, Copérnico causou uma grande agitação ao sugerir que a Terra não era o centro do universo, implicando que os humanos não eram os seres mais importantes desse universo, como era sugerido por um deus antropocêntrico.

1543

Copérnico propõe que são os planetas que orbitam em torno do Sol

1576

Tycho Brahe faz registos detalhados das posições dos planetas

1609

Kepler descobre que os planetas se movem em órbitas elípticas

1687

Newton explica as leis de Kepler com a sua lei da gravitação

Kepler adotou a ideia heliocêntrica de Copérnico, mas continuou mesmo assim a acreditar que os planetas giravam em torno do Sol em órbitas circulares. Ele concebeu um sistema em que as órbitas dos planetas estavam contidas numa série de esferas concêntricas, espaçadas de acordo com raios matemáticos derivados dos tamanhos de formas tridimensionais que se encaixassem nelas. De forma que ele imaginou uma série de polígonos com um número cada vez maior de lados que se encaixassem dentro das esferas. A ideia de que as leis da natureza seguiam raios geométricos básicos tinha sido originada pelos gregos antigos.

A palavra planeta vem do termo grego para «deambulante». Como os outros planetas no nosso sistema solar estão muito mais próximos da Terra do que as estrelas longínquas, eles parecem deambular através do céu. Noite após noite, eles traçam um percurso através das estrelas. De vez em quando, no entanto, os seus percursos invertem-se e eles dão uma pequena volta para trás. Estes movimentos retrógrados eram considerados maus augúrios. No modelo ptolemaico dos movimentos planetários, era impossível compreender este comportamento, de forma que os astrónomos acrescentaram «epiciclos», ou rotações adicionais nas órbitas, que simulavam este movimento. Mas os epiciclos não funcionavam muito bem. O universo de Copérnico centrado no Sol precisava de menos epiciclos do que o velho modelo centrado na Terra, mas mesmo assim não conseguia explicar os detalhes mais subtis.

Leis de Kepler

Primeira lei As órbitas planetárias são elípticas, tendo o Sol num dos seus focos.

Segunda lei Um planeta varre, na sua órbita em torno do Sol, áreas iguais em tempos iguais.

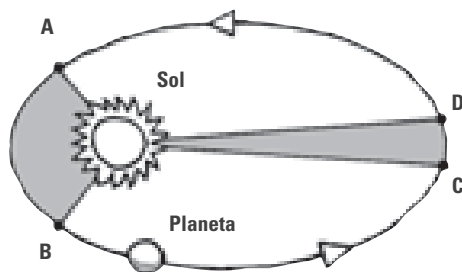
Terceira lei Os períodos orbitais aumentam com o tamanho da elipse, de tal forma que o período quadrado é proporcional ao comprimento de eixo semi-maior ao cubo.

Ao tentar modelar as órbitas dos planetas para elas ficarem de acordo com as suas ideias geométricas, Kepler utilizou os dados mais precisos que estavam disponíveis, tabelas complicadíssimas dos movimentos dos planetas através do céu, preparadas com extrema exaustão por Tycho Brahe. Nessas colunas de números Kepler viu padrões que lhe sugeriram as suas três leis.

A grande inspiração de Kepler surgiu quando ele deslindou os movimentos retrógrados de Marte. Ele deu-se conta de que as voltas que os planetas davam no seu movimento para trás faziam sentido se as órbitas em torno do Sol fossem elípticas, e não circulares, como então se pensava. Isto queria dizer, ironicamente, que

a natureza não seguia formas perfeitas. Kepler deve ter ficado satisfeitíssimo por ter conseguido descobrir órbitas que se ajustavam aos dados, mas também chocado por toda a sua filosofia de geometria pura se ter revelado completamente errada.

Órbitas A segunda lei de Kepler descreve o quão rapidamente um planeta se move na sua órbita. À medida que o planeta se move ao longo do seu percurso, ele varre um segmento de área igual em iguais intervalos de tempo. O segmento é medido usando o ângulo desenhado entre o Sol e as duas posições do planeta (AB ou CD), como se fosse a fatia de um bolo. Como as órbitas são elípticas, quando o planeta está mais próximo do Sol ele tem de percorrer uma distância maior para varrer a mesma área que varre quando está mais longe. De forma que o planeta move-se mais depressa quando está próximo do Sol do que quando está longe. A segunda lei de Kepler relaciona a velocidade do planeta com a sua distância ao Sol. Embora Kepler não se tenha dado conta na altura, este comportamento é, em última análise, devido à gravidade fazer com que o planeta acelere, movendo-se mais depressa quando está mais próximo do Sol.



A terceira lei de Kepler dá mais um passo em frente e diz-nos como é que os períodos orbitais variam para elipses de tamanhos diferentes, numa gama de distâncias ao Sol. A lei afirma que os quadrados dos períodos orbitais são directamente proporcionais aos cubos dos eixos mais longos da órbita elíptica. Quanto maior for a órbita elíptica, mais longo será o período, ou seja, o tempo necessário para completar uma órbita. Um planeta a orbitar em torno do Sol a uma distância duas vezes superior à da Terra levaria oito vezes mais tempo a dar uma volta completa. De forma que planetas mais distantes do Sol orbitam mais lentamente do que planetas mais próximos. Marte leva quase 2 anos terrestres para dar uma volta completa em torno do Sol, Saturno leva 9 anos e Neptuno 165 anos.

**“Medi os céus,
agora as sombras
eu meço,
Presa aos céus
estava a mente,
preso à terra o
corpo repousa.”**

Epitáfio de Kepler, 1630

Com estas três leis, Kepler descreveu as órbitas dos planetas do nosso sistema solar. As suas leis também se aplicam a qualquer corpo em órbita em torno de outro corpo, desde cometas, asteróides e luas no nosso sistema solar, a planetas em torno de outras estrelas. Kepler unificou os princípios e exprimiu-os como leis geométricas, mas não sabia porque é que estas leis funcionavam. Ele acreditava que as leis tinham surgido dos padrões geométricos subjacentes à natureza. Foi preciso esperar por Newton para estas leis serem unificadas numa teoria universal da gravidade.

a ideia resumida
Lei dos mundos

04 A lei da gravitação de Newton

Isaac Newton deu um salto de gigante ao relacionar os movimentos de balas de canhão e de fruta a cair de árvores com os movimentos dos planetas. A sua lei da gravitação é uma das ideias mais poderosas da física, explicando grande parte do comportamento físico do nosso mundo. Newton defendeu que todos os corpos se atraem mutuamente através da força da gravidade, e que a intensidade dessa força diminui com o quadrado da distância.

‘A gravidade é um vício difícil de largar.’

**Terry Pratchett,
1992**

A ideia da gravidade terá supostamente surgido a Newton quando ele viu uma maçã a cair de uma árvore. Não sabemos se isto é verdade ou não, mas Newton estendeu a sua imaginação dos movimentos terrestres até aos celestes para descobrir a sua lei da gravitação.

Newton deu-se conta de que os objectos eram atraídos ao chão por algum tipo de força aceleradora (ver a página 9). Se as maçãs caem das árvores, o que aconteceria se a árvore fosse ainda mais alta? E se a árvore chegasse à Lua? Porque é que a Lua não cai na Terra como uma maçã?

Tudo cai A resposta de Newton baseava-se em primeiro lugar no facto de as suas leis do movimento ligarem forças, massa e aceleração. Uma bala disparada por um canhão percorre uma certa distância antes de cair no chão. E se ela fosse disparada mais rapidamente? Nesse caso iria mais longe. E se ela fosse disparada tão depressa e percorresse uma distância suficientemente grande que a curvatura da Terra afastasse o chão da bala, onde é que ela iria cair? Newton deu-se conta de que a bala iria ser puxada em direcção à Terra, mas iria seguir

Cronologia

350 A.C.

Aristóteles discute a razão de os objectos caírem

1609 D.C.

Kepler descobre as leis das órbitas planetárias

uma órbita circular. Da mesma forma que um satélite está constantemente a ser puxado para baixo mas nunca atinge o chão.

Quando os atletas olímpicos que praticam o lançamento do martelo giram em torno dos seus calcanhares, é a tensão na corda que mantém o martelo a rodar. Sem isso, o martelo iria sair disparado em linha recta, tal como sucede quando o atleta o deixa ir. Passa-se a mesma coisa com a bala de canhão de Newton – sem a força dirigida para o centro da Terra que amarra o projectil ao planeta, ele iria escapar para o espaço. Pensando um pouco mais, Newton deduziu que a Lua também fica suspensa nos céus porque está segura pelos laços da gravidade. Sem ela a Lua escaparia para o espaço.



Lei do inverso do quadrado Newton tentou então quantificar as suas previsões. Depois de trocar cartas com Robert Hooke, Newton mostrou que a gravidade segue uma lei do inverso do quadrado – a intensidade da gravidade diminui com o quadrado da distância a um corpo. De forma que, se vocês se afastarem de um corpo até a vossa distância a ele duplicar, a sua gravidade terá diminuído quatro vezes; a gravidade exercida pelo Sol seria quatro vezes mais pequena para um planeta em órbita a uma distância duas vezes maior que a da Terra, e um planeta três vezes mais distante do Sol sentiria uma gravidade nove vezes menor.

A lei do inverso do quadrado de Newton explicava, numa única equação, as órbitas de todos os planetas, tal como tinham sido descritas nas três leis de Johannes Kepler (ver página 12). A lei de Newton previa que os planetas andavam mais depressa estando mais próximos do Sol à medida que seguiam os seus percursos elípticos. Um planeta sente uma força gravitacional causada pelo Sol mais intensa quando se aproxima dele, o que faz com que a sua velocidade aumente. À medida que a sua velocidade aumenta, o planeta é outra vez atirado para longe do Sol, gradualmente movendo-se mais lentamente. Assim, Newton reuniu todo o trabalho prévio numa teoria única e fundamental.

“Qualquer objecto do universo atrai qualquer outro segundo uma linha aos centros dos objectos, proporcional à massa de cada objecto, e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os objectos.”

Isaac Newton, 1687

1640

Galileu enuncia o princípio da inércia

1687

Os *Principia* de Newton são publicados

1905

Einstein publica a teoria da relatividade restrita

1915

Einstein publica a teoria da relatividade geral

À superfície da Terra, a aceleração devida à gravidade, g , é de 9,8 metros por segundo ao quadrado.

Lei universal Numa generalização audaz, Newton propôs então que a sua teoria da gravidade se aplicava a todas as coisas do universo. Qualquer corpo exerce uma força gravitacional proporcional à sua massa, e essa força decai com o inverso do quadrado da distância ao corpo. De forma que dois corpos quaisquer atraem-se mutuamente. Mas como a gravidade é uma força fraca, só conseguimos observar os seus efeitos para corpos com uma massa enorme, como o Sol, a Terra e os planetas.

No entanto, se olharmos com mais atenção, é possível observar pequenas variações na intensidade local da gravidade à superfície da Terra. Como montanhas de grande massa e rochas de densidade variável podem aumentar ou reduzir a intensidade da gravidade na sua vizinhança, é possível utilizar um gravitómetro para mapear a geografia de terrenos e para aprender algo acerca da estrutura da crosta da Terra.

Por vezes, os arqueólogos usam pequenas alterações na gravidade para detectarem povoações antigas enterradas. E os cientistas usaram recentemente satélites espaciais capazes de medir alterações de gravidade para registarem a quantidade (cada vez menor) de gelo que cobre os pólos da Terra, e também para detectarem mudanças na crosta da Terra na sequência de grandes terremotos.

Voltando ao século XVII, Newton canalizou todas as suas ideias acerca da gravidade para uma série de livros, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, conhecido como os *Principia*. Publicados em 1687, os *Principia* ainda são considerados como um dos pontos altos do desenvolvimento

A descoberta de Neptuno

O planeta Neptuno foi descoberto graças à lei da gravitação de Newton. No início do século XIX, os astrónomos notaram que Úrano não seguia uma órbita simples, antes parecia comportar-se como se um outro corpo o estivesse a influenciar. Foram feitas várias previsões baseadas na lei de Newton e, em 1846, o novo planeta, baptizado Neptuno como o deus dos mares, foi descoberto próximo da posição esperada. Os astrónomos britânicos e franceses não se

entenderam quanto à autoria da descoberta, que é atribuída, em *ex-aecquo*, a John Couch Adams e a Urbain Le Verrier. Neptuno tem uma massa 17 vezes superior à da Terra e é um «gigante gasoso», com uma atmosfera espessa de hidrogénio, hélio, amoníaco e metano a cobrir um núcleo sólido. A cor azul das nuvens de Neptuno é devida ao metano. Os seus ventos são os mais intensos do sistema solar, chegando a atingir os 2500 quilómetros por hora.

Marés

Newton descreveu a formação das marés oceânicas na Terra no seu livro *Principia*. As marés ocorrem porque a Lua atrai de forma diferente os oceanos no lado mais próximo e no mais distante da Terra, comparados com a Terra sólida. A atracção gravitacional diferente em lados opostos da Terra faz com que a água à superfície se deforme, aproximando-se ou afastando-se da Lua, levando a marés que sobem e descem a cada 12 horas. Embora o Sol, com uma massa muito maior, exerça uma força gravitacional sobre a Terra mais intensa do que a exercida pela Lua, muito mais leve, a Lua tem um efeito de maré

superior porque está mais próxima da Terra. A lei do inverso do quadrado significa que o gradiente gravitacional (a diferença sentida pelo lado mais próximo e pelo mais distante da Terra) seja muito maior para a Lua mais próxima do que para o Sol mais longínquo. Durante uma Lua cheia ou nova, a Terra, o Sol e a Lua estão todos alinhados e daí resultam marés especialmente altas, chamadas «marés de sizígia». Quando esses três corpos estão desalinhados e fazem 90 graus um com o outro, surgem marés mais fracas a que se dá o nome de «marés de quadratura».

científico. A gravitação universal de Newton explicava os movimentos, de planetas e de luas, e também de projecteis, pêndulos e maçãs. Ele explicou as órbitas de cometas, a formação das marés e a inclinação do eixo da Terra. Este trabalho estabeleceu Newton como um dos maiores cientistas de todos os tempos.

A lei da gravitação universal de Newton foi utilizada durante centenas de anos, e ainda hoje dá uma descrição básica do movimento dos corpos. Contudo, os cientistas do século XX foram para além do que Newton tinha construído, sobretudo Einstein, com a sua teoria da relatividade geral. A gravidade newtoniana continua a funcionar bem para a maior parte dos objectos que vemos e para o comportamento dos planetas, cometas e asteróides do sistema solar que estão dispersos a distâncias grandes do Sol, onde a gravidade é relativamente fraca. Embora a gravidade de Newton tenha conseguido calcular a posição do planeta Neptuno, foi a órbita do planeta Mercúrio que requereu física para lá da de Newton. A relatividade geral é pois necessária para explicar situações em que a gravidade é muito forte, como por exemplo próximo do Sol, de estrelas e de buracos negros.

‘Tem sido dito que lutar contra a globalização é como lutar contra as leis da gravidade.’

Kofi Annan,
nascido em 1938

a ideia resumida
Atracção de massas

05 A conservação da energia

A energia é uma força animadora que faz com que as coisas se movam ou mudem. Ela aparece sob muitas formas e pode manifestar-se como uma alteração na altura ou na velocidade, como ondas electromagnéticas a propagarem-se ou em vibrações de átomos que causam calor. Embora a energia se possa metamorfosear entre estes diferentes tipos, a quantidade global de energia é sempre conservada. Não se pode criar mais e ela nunca pode ser destruída.

Todos nós estamos familiarizados com a energia como sendo algo de básico que governa as nossas vidas. Se estamos cansados, falta-nos energia; se estamos aos pulos de contentamento, temos-a. Mas o que é a energia? A energia que alimenta os nossos corpos provém da combustão de químicos, moléculas de um tipo que se transformam noutras, sendo que nesse processo se liberta energia. Mas que tipos de energia fazem com que um esquiador acelere ao descer uma encosta, ou que uma lâmpada brilhe? Essas formas de energia são todas realmente a mesma coisa?

A energia é difícil de definir porque surge com aspectos tão diferentes. Mesmo agora, os físicos não sabem o que ela é intrinsecamente, embora sejam peritos em descrever o que ela faz e como manuseá-la. A energia é uma propriedade da matéria e do espaço, uma espécie de combustível, ou impulso encapsulado, com o potencial para criar, para mover ou para mudar. Desde o tempo dos gregos que os filósofos naturais tinham uma vaga noção da energia como sendo uma força ou essência que dava vida aos objectos, e esta ideia tem-nos acompanhado ao longo das eras.

Cronologia

c. 600 A.C.

Tales de Mileto dá-se conta de que os materiais mudam de forma

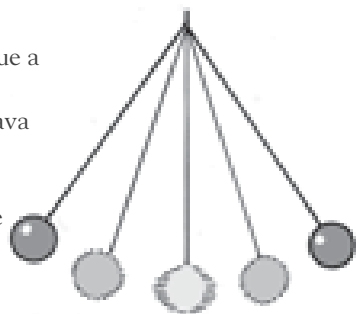
1638 D.C.

Galileu observa a troca entre energia cinética e potencial num pêndulo

1676

Leibniz formula matematicamente as trocas de energia e dá-lhe o nome de *vis viva*

Troca de energia Foi Galileu quem notou, pela primeira vez, que a energia se podia transformar de um tipo em outro. Ao observar um pêndulo a oscilar para trás e para a frente, ele viu que o balanço trocava altura por movimento, e vice-versa, à medida que a velocidade arrastava o pêndulo de volta à posição mais acima, para depois cair outra vez e repetir o ciclo. O balanço do pêndulo não tem velocidade nenhuma quando está no ponto mais alto da sua trajectória, e move-se com velocidade máxima quando passa pelo ponto mais baixo.



Galileu deduziu que havia duas formas de energia a serem trocadas pelo pêndulo no decorrer do seu balanço. Uma é a energia potencial gravítica, que é capaz de erguer um corpo acima da Terra, e que se opõe à gravidade. É preciso adicionar energia gravitacional para levantar uma dada massa mais alto, e ela liberta-se quando a massa cai. Se já alguma vez subiram uma colina inclinada de bicicleta, saberão muito bem que é precisa uma grande quantidade de energia para lutar contra a gravidade. O outro tipo de energia no balanço do pêndulo é energia cinética – a energia do movimento que surge com a velocidade. De forma que o pêndulo converte energia potencial gravítica em energia cinética e vice-versa. Uma ciclista esperta utiliza exactamente o mesmo mecanismo. Ao descer uma colina inclinada, ela seria capaz de aumentar a sua velocidade e ir disparada para a base da colina mesmo sem pedalar, e poderia usar essa velocidade para subir parte da próxima colina (ver caixa).

Da mesma forma, a simples conversão de energia potencial em energia cinética pode ser utilizada para fornecer electricidade às nossas casas. As barragens hidroeléctricas e de marés deixam cair a água de uma dada altura, usando a sua velocidade para fazer girar turbinas e gerar electricidade.

Fórmulas de energia

A energia potencial (EP) gravítica escreve-se, de forma algébrica, como $EP = mgh$, ou massa (m) vezes a aceleração gravitacional (g) vezes a altura (h). Isto é o equivalente à força ($F=ma$, da segunda lei de Newton) vezes a distância. De maneira que uma força está a fornecer energia.

A energia cinética (EC) é dada por $EC = \frac{1}{2} mv^2$, de forma que a quantidade de energia aumenta com o quadrado da velocidade (v). Esta fórmula também surge ao calcularmos a força média vezes a distância percorrida.

1807

Young dá o nome «energia» à energia

1905

Einstein mostra que energia e massa são equivalentes

Muitas facetas de energia A energia manifesta-se sob muitas formas diferentes, que podem ser armazenadas temporariamente de maneiras diferentes. Uma mola comprimida pode armazenar no seu interior a energia elástica que podemos libertar quando a soltarmos. A energia do calor aumenta as vibrações dos átomos e das moléculas de um material quente. De forma que uma frigideira de metal num fogão aquece porque os seus átomos estão a ser forçados a agitar-se mais pela energia que lhes está a ser fornecida. A energia também pode ser transmitida sob a forma de ondas eléctricas e magnéticas, como por exemplo as ondas luminosas e de rádio, e a energia química armazenada pode ser libertada por reacções químicas, como sucede nos nossos sistemas digestivos.

Einstein descobriu que a própria massa tem uma energia associada que pode ser libertada se a matéria for destruída. Então, a massa e a energia são equivalentes. Esta é a famosa equação de Einstein, $E = mc^2$ – a energia (E) libertada pela destruição de uma massa (m) é m vezes a velocidade da luz (c) ao quadrado. Esta energia é libertada numa explosão nuclear, ou nas reacções de fusão que fazem com que o nosso Sol brilhe (ver as páginas 136-143). Como é proporcional ao quadrado da velocidade da luz, que é enorme (a luz viaja, no vácuo, a 300 milhões de metros por segundo), a quantidade de energia libertada ao destruímos nem que sejam uns poucos átomos é enorme.

Nós consumimos energia nas nossas casas e usamo-la para fazer funcionar a indústria. Falamos acerca de energia a ser gerada, mas na verdade ela está só a ser transformada de um tipo em outro. Tiramos energia química do carvão ou do gás natural e convertemo-la em calor, que faz girar turbinas e cria electricidade. Em última análise, até a energia química do carvão e do gás provém do Sol, de forma que a energia solar está na base de tudo aquilo que funciona na Terra. Embora nos preocupemos com o facto de as reservas energéticas da Terra serem limitadas, a quantidade de energia que pode ser derivada do Sol é mais do que suficiente para suprir as nossas necessidades, se a conseguirmos dominar.

Conservação da energia A conservação da energia como regra da física é muito mais do que simplesmente reduzir os nossos gastos de energia doméstica; este princípio afirma que a quantidade total de energia fica inalterada, embora possa alternar entre diferentes tipos de energia. Este conceito surgiu numa altura relativamente recente, e só depois de muitos tipos diferentes de energia terem sido estudados. No começo do século XIX, Thomas Young introduziu a palavra energia; antes disso, esta força vital tinha sido chamada *vis viva* por Gottfried Leibniz, que foi quem fez pela primeira vez a formulação matemática do pêndulo.

Descobriu-se muito rapidamente que a energia cinética, por si só, não se conservava. As bolas e as rodas perdiam velocidade e não se moviam para sempre. Mas os movimentos rápidos faziam muitas vezes com que as máquinas aquecessem devido à fricção, como sucede quando uma broca

de metal escava um tubo, de forma que os experimentadores deduziram que o calor era um dos destinatários da energia libertada no movimento. De forma gradual, ao contabilizarem todos os diferentes tipos de energia nas máquinas que construía, os cientistas começaram a demonstrar que a energia é transferida de uma forma para outra e não é nem destruída nem criada.

Momento Em física, a ideia de conservação não se limita à energia. Há dois outros conceitos que estão intimamente relacionados com este – a conservação do momento linear e a conservação do momento angular. O momento linear é definido como o produto da massa pela velocidade, e descreve a dificuldade em travar um corpo que esteja em movimento. Um objecto pesado que se esteja a mover depressa terá um momento elevado e será difícil desviá-lo ou pará-lo: um camião a andar a 60 quilómetros por hora tem maior momento do que um carro a mover-se à mesma velocidade. O momento não tem só tamanho porque, devido à velocidade, também actua numa direcção e sentido específicos. Objectos que colidem trocam momento entre si, de tal forma que ele é globalmente conservado, quer na sua quantidade quer na sua direcção. Se alguma vez jogaram bilhar ou *snooper*, vocês já usaram esta lei. Quando duas bolas chocam, elas transferem movimento de uma para a outra de forma a conservar o momento. Por isso, se acertarem numa bola parada com outra em movimento, os percursos finais de ambas serão uma combinação da velocidade e da direcção da bola inicial que estava a mover-se. A velocidade e a direcção de ambas podem ser calculadas assumindo que o momento se conserva em todas as direcções.

A conservação do momento angular é similar. O momento angular, para um objecto a rodar em torno de um ponto, é definido como o produto do momento linear do objecto pela distância a que ele está do ponto de rotação. A conservação do momento angular é utilizada com resultados espectaculares pelos patinadores no gelo, ao rodarem. Quando os seus braços e pernas estão esticados, eles giram devagar, mas basta que eles aproximem os braços do corpo para conseguirem rodar mais depressa. Isto sucede porque um tamanho mais pequeno requer uma velocidade de rotação maior para compensar. Tentem fazer isto numa cadeira de escritório, vão ver que também resulta.

A conservação da energia e do momento continua a ser um dos princípios basilares da física moderna. É um conceito que encontrou acolhimento até em campos contemporâneos, como a relatividade geral e a mecânica quântica.

a ideia resumida

Energia indestrutível

06 O movimento harmónico simples

Muitas vibrações adoptam um movimento harmónico simples, que imita o baloiçar de um pêndulo. Este movimento, que está relacionado com o movimento circular, é observado em átomos vibrantes, circuitos eléctricos, ondas de água, ondas luminosas e até em pontes a abanar. Embora o movimento harmónico simples seja previsível e estável, acrescentar uma força externa, por mais pequena que ela seja, pode destabilizá-lo e desencadear uma catástrofe.

As vibrações são extremamente comuns. Todos nós já nos atirámos para uma cama ou cadeira com boas molas e ficámos a abanar por uns segundos, ou talvez já tenhamos dedilhado uma corda de guitarra, tentado agarrar um cabo eléctrico a baloiçar ou ouvido um *feedback* altíssimo de um altifalante. Tudo isto são exemplos de vibrações.

O movimento harmónico simples descreve a forma segundo a qual um objecto que é empurrado para longe de um sítio sente uma força que o tenta restaurar à sua posição inicial. Ao ultrapassar o ponto de partida, o objecto balouça de um lado para o outro até acabar por estabilizar na sua posição original. Para provocar um movimento harmónico simples, a força de correcção tem de se opor sempre ao movimento do objecto e aumentar com a distância a que ele foi deslocado. De forma que se o objecto se afastar mais, ele irá sentir uma força maior a puxá-lo de volta. Uma vez em movimento, ele vai ser atirado para o outro lado e, tal como uma criança num baloiço, torna a sentir uma força que o puxa para trás, que eventualmente faz com que pare e o faz recuar outra vez. Acaba, portanto, por oscilar de um lado para o outro.

Cronologia

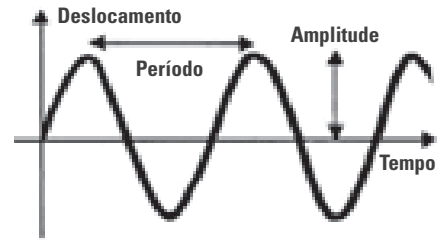
1640 D.C.

Galileu inventa o relógio de pêndulo

1851

O pêndulo de Foucault demonstra a rotação da Terra

Pêndulos Uma outra forma de imaginar o movimento harmónico simples é vê-lo como um movimento circular a ser projectado numa linha, como por exemplo a sombra do balouço da criança, projectada no chão. Tal como o balanço do pêndulo, a sombra do balouço, ao mover-se para trás e para a frente à medida que o miúdo se mexe, desloca-se devagar nas extremidades do ciclo e depressa no meio dele. Em ambos os casos, o pêndulo ou o balouço está a trocar energia potencial gravítica, ou altura, por energia cinética, ou velocidade.



Um pêndulo a baloiçar segue um movimento harmónico simples. A distância a que ele está do ponto central de onde começou o movimento segue, ao longo do tempo, uma onda sinusoidal, ou, dito de outra forma, um tom harmónico à frequência do pêndulo. O corpo pendurado no pêndulo gostava de estar quieto na sua posição vertical mas, uma vez empurrado para um dos lados, a força da gravidade puxa-o de volta para o centro e aumenta a sua velocidade, fazendo com que as oscilações persistam.

A Terra em rotação Os pêndulos são sensíveis à rotação da Terra. A rotação da Terra faz com que o plano no qual eles estão a baloiçar rode um pouco em cada oscilação. Se imaginarmos um pêndulo no Pólo Norte, ele está a baloiçar num plano que está fixo relativamente às estrelas. A Terra está a rodar por baixo dele, de forma que, ao observarmos o seu movimento de oscilação a partir de um ponto na Terra, ele parece rodar 360 graus num dia. Se o pêndulo estivesse pendurado no Equador não haveria nenhum efeito desta rotação sobre o pêndulo, visto que ele estaria a rodar com a Terra, de tal maneira que o plano da sua rotação não mudava. Em qualquer outra latitude, o efeito da rotação vai estar entre estes dois extremos. Logo, o facto de a Terra estar a rodar pode ser demonstrado simplesmente ao observar um pêndulo.

O físico francês Léon Foucault fez uma demonstração deste facto para o grande público, ao pendurar um pêndulo enorme, de 70 metros de altura, do tecto do Panteão em Paris. Hoje em dia há muitos museus pelo mundo inteiro que também têm pêndulos de Foucault gigantescos. Para funcionarem, é preciso que ao largar o pêndulo a primeira oscilação seja feita com muito cuidado, de tal forma que o plano de oscilação seja estável e não se introduzam nenhuma torções. A forma tradicional de fazer isto é atar o pêndulo com um cordel e depois cortar esse

1940

A ponte de Tacoma Narrows colapsa

2000

A Ponte do Milénio (ou «baloiçante») em Londres é afectada por uma ressonância e é encerrada

“Se se acrescenta um velho penny inglês ao pêndulo [do Big Ben] ele ganha dois quintos de um segundo por dia. Ainda não fizemos as contas com o euro.”

Thwaites & Reed, 2001

(Firma de manutenção do Big Ben)

cordel, queimando-o com uma vela, para que o corpo seja libertado gentilmente. Para que os pêndulos gigantes fiquem em movimento durante muito tempo muitas vezes eles são ajudados por motores, para compensar a perda de velocidade devida à resistência do ar.

Manter o tempo Embora fosse conhecido desde o século X, foi só no século XVII que o pêndulo começou a ser utilizado em grande escala para construir relógios. O tempo que um pêndulo demora a balouçar depende do comprimento do fio. Quanto mais curto for o fio mais rápido o pêndulo balança. Para que o Big Ben em Londres dê as horas de forma precisa, o comprimento do pesadíssimo pêndulo que lhe serve de relógio é ajustado acrescentando-lhe velhas moedas de *pence*. As moedas alteram o centro de massa do corpo suspenso, o que é mais fácil e mais preciso de alterar do que mover o pêndulo inteiro para cima e para baixo.

O movimento harmónico simples não se limita aos pêndulos, é na realidade muito comum na natureza. É observado sempre que ocorrem vibrações livres, desde correntes oscilatórias em circuitos eléctricos ao movimento de partículas em ondas na água, e até o movimento dos átomos no universo primitivo.

good vibrations

Os circuitos electrónicos podem oscilar quando as correntes eléctricas que neles fluem deslizam de um lado para o outro, exactamente como o movimento de um pêndulo. Esses circuitos podem fazer sons electrónicos. Um dos instrumentos electrónicos mais antigos é o *theremin*. Produz tons estranhíssimos, ascendentes e descendentes, e foi usado pelos Beach Boys na sua canção *Good vibrations*. O *theremin* consiste em duas antenas electrónicas e é tocado sem sequer tocar no instrumento, simplesmente agitando as mãos ao pé dele.

O artista controla o tom, mais agudo ou mais grave, com uma das mãos, e o volume com a outra, cada uma das mãos actuando como parte de um circuito electrónico. O *theremin* foi baptizado em honra ao seu inventor, o físico russo Léon Theremin, que estava a desenvolver sensores de movimento para o governo russo em 1919. Ele demonstrou o aparelho a Lenine, que ficou impressionado, e apresentou-o aos Estados Unidos nos anos 1920. Os *theremins* foram comercializados por Robert Moog, que depois viria a desenvolver o sintetizador electrónico que revolucionou a música *pop*.

Ressonâncias Vibrações mais complicadas podem ser descritas tomando o movimento harmónico simples como um ponto de partida e adicionando forças extra. As vibrações podem ser aumentadas, adicionando energia extra com um motor, ou amortecidas, absorvendo alguma da sua energia de forma a que elas diminuam. Por exemplo, uma corda de violoncelo pode ser posta a vibrar durante um tempo muito longo se a arpejarmos regularmente. Ou podemos amortecer o som de uma corda de piano se aplicarmos um bloco de feltro para absorver a sua energia. As forças amplificadoras, como as introduzidas pelo arco do violoncelo, podem ser sincronizadas de forma a reforçar as oscilações principais, ou podem estar dessincronizadas. Se não estiverem síncronas, o sistema oscilante pode começar a comportar-se de uma forma surpreendentemente esquisita muito depressa.

Esta alteração dramática de comportamento selou o destino de uma das pontes mais compridas dos Estados Unidos: a Ponte Tacoma Narrows, em Washington. A ponte suspensa ao longo do Tacoma Narrows actua como uma corda de guitarra grossa – vibra facilmente a frequências específicas que correspondem ao seu comprimento e às suas dimensões. Tal como uma corda musical, a ponte ressoa com esta nota fundamental, mas também reverbera com harmónicas (múltiplos) dessa nota de base. Os engenheiros tentam conceber pontes para que as suas notas fundamentais sejam muito diferentes das de fenómenos naturais, como as vibrações devidas ao vento, a carros ou águas em movimento. No entanto, naquele dia fatídico os engenheiros não se tinham acautelado o suficiente.

A Ponte Tacoma Narrows (conhecida localmente como a *Gertie Galopante*) tem mais de quilómetro e meio e é feita de barras de aço pesadíssimas e de cimento. Apesar disso, num dia de Novembro em 1940, o vento tornou-se tão forte que começou a estabelecer oscilações de torção na frequência de ressonância da ponte, o que fez com que ela desatasse a abanar com grande violência e acabasse por se partir e colapsar. Felizmente não houve baixas, à excepção de um cão aterrorizado que mordeu a pessoa que tentou salvá-lo de um carro antes de ser atirado para fora da ponte. Desde essa altura, os engenheiros consertaram a ponte para impedir que ela se torcesse, mas mesmo hoje em dia as pontes podem por vezes sofrer ressonâncias devido a forças imprevistas.

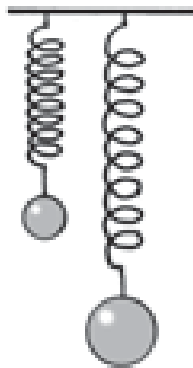
As vibrações que são amplificadas por energia adicional podem ficar descontroladas muito depressa, e podem comportar-se de forma errática. Podem até tornar-se caóticas, de forma que deixam de seguir um padrão regular ou previsível. O movimento harmónico simples é o comportamento estável de base a todos estes movimentos, mas a estabilidade é facilmente estragada.

a ideia resumida

A ciência do balouço

07 A lei de Hooke

Originalmente deduzida a partir de molas esticadas em relógios, a lei de Hooke mostra a forma como os materiais se deformam quando se lhes aplica uma força. Os materiais elásticos esticam-se em proporção directa à força. Contribuinte prolífico para a arquitectura, bem como para a ciência, é estranho que Robert Hooke só seja recordado por esta lei. Mas, tal como o seu descobridor, a lei de Hooke intersecta muitos campos diferentes, sendo utilizada em engenharia e em construção, bem como na ciência dos materiais.



Quando vêm as horas no vosso relógio de bolso, têm uma dívida para com Robert Hooke, o polímata britânico do século XVII que não só inventou as molas principais e os mecanismos de escape para os relógios como também construiu o hospício de Bedlam e baptizou a célula na biologia. Hooke era muito mais um experimentalista do que um matemático. Ele organizou demonstrações científicas na Royal Society, em Londres, e inventou muitas máquinas. Enquanto estava a trabalhar com molas, descobriu a lei de Hooke, que diz que o comprimento segundo o qual uma mola se estica é proporcional à força com a qual vocês a estão a puxar. De forma que se a puxarem com uma força duas vezes maior ela estica-se o dobro.

Elasticidade Chamam-se «elásticos» aos materiais que obedecem à lei de Hooke. Os materiais elásticos não só se esticam como regressam à sua forma original quando todas as forças são removidas – o seu esticamento é reversível. As tiras de elástico e as molas rígidas comportam-se desta maneira. Por outro lado, a pastilha elástica já não – ela estica-se quando vocês a puxam, mas continua esticada mesmo quando vocês param. Há muitos materiais que se comportam elasticamente dentro de uma gama

Cronologia

1660 D.C.

Hooke descobre a sua lei da elasticidade

1773

Harrison recebe um prémio pela medição bem-sucedida da longitude

ROBERT HOOKE 1635–1703

Robert Hooke nasceu na Ilha de Wight, filho de um cura. Estudou em Christ Church, em Oxford, trabalhando como assistente do físico e químico Robert Boyle. Em 1660 descobriu a lei de Hooke da elasticidade e pouco depois foi nomeado Curador de Experiências nos encontros da Royal Society. Ao publicar *Micrographia*, cinco anos depois, Hooke inventou a palavra «célula», por ter comparado a aparência das células de plantas vistas ao microscópio com as celas de monges. Em 1666, Hooke ajudou a reconstruir Londres depois do Grande

Incêndio, trabalhando com Christopher Wren no Observatório Real de Greenwich, no Monumento ao Grande Fogo e no Hospital Real Bethlem (mais conhecido como «Bedlam»). Morreu em Londres em 1703 e foi enterrado em Bishopsgate, em Londres, mas os seus restos foram trasladados para o Norte de Londres no século XIX e hoje em dia não se sabe onde param. Em Fevereiro de 2006 descobriu-se uma cópia, há muito perdida, das notas de Hooke das reuniões da Royal Society, hoje em dia exibida na Royal Society em Londres.

modesta de forças. Mas se puxarem com demasiada força, eles podem partir-se ou deixar de esticar-se. Outros materiais são demasiado rígidos ou maleáveis para serem chamados de elásticos, como por exemplo a cerâmica ou o barro.

De acordo com a lei de Hooke, um material elástico requer sempre a mesma quantidade de força para ser esticado de um dado comprimento. Esta força característica depende da rigidez do material (a que se chama a sua constante elástica). Um material rígido precisa de uma grande força para ser esticado. Exemplos de materiais com rigidez muito elevada são substâncias como o diamante, o carboneto de silício e o tungsténio. Materiais mais maleáveis são, por exemplo, ligas de alumínio e madeira.

Diz-se de um material que foi esticado que está sob esforço. O esforço é definido como a percentagem de aumento do seu comprimento devido ao esticamento. À força que é aplicada (por unidade de área) também se

1979

O primeiro *bungee jumping* ocorre em Bristol, no Reino Unido

chama tensão. A rigidez é definida como sendo o rácio da tensão pelo esforço. Muitos materiais, como por exemplo o aço, a fibra de carbono e até o vidro, têm uma constante elástica que não varia (para pequenos esforços), e por isso seguem a lei de Hooke. Ao construir edifícios, os arquitectos e os engenheiros levam estas propriedades em conta para que, quando se aplicam cargas muito pesadas, a estrutura não estique ou dobre.

Saltitões A lei de Hooke não é só para engenheiros. Milhares de adeptos de desportos radicais dependem dela todos os anos quando praticam *bungee jumping*, ao atirarem-se de uma plataforma bem alta atados por uma corda elástica. A lei de Hooke diz ao saltador quanto é que a corda se vai esticar quando sentir a força do seu peso. É crucial que este cálculo seja bem feito, e que se use o comprimento correcto de corda, de forma que a pessoa que se atirou de cabeça e está a cair a toda a velocidade em direcção ao chão seja puxada de volta antes de se estatelar. Como desporto, o *bungee jumping* foi adoptado por destemidos britânicos que se atiraram da Ponte Suspensa Clifton, em Bristol, em 1979, aparentemente inspirados por terem visto imagens na televisão de nativos de Vanuatu a saltarem de grandes alturas com lianas de árvores atadas aos seus tornozelos, como teste de bravura. Os saltadores foram presos, mas continuaram a pular de pontes e espalharam a sua ideia pelo mundo fora até que ela se tornou uma experiência comercializada.

Longitude Os viajantes também confiam na lei de Hooke para navegar, embora de forma diferente. Embora medir a latitude, de norte a sul, seja fácil, bastando para isso monitorar a altura do Sol e das estrelas no céu, é muito mais difícil determinar a nossa longitude, ou localização este-oeste, ao longo da Terra. No século XVII e começo do século XVIII, os marinheiros corriam perigo de vida por serem incapazes de determinar com precisão onde estavam. O governo Britânico ofereceu uma recompensa em dinheiro de 20 000 libras, uma quantia enorme para a altura, para quem quer que conseguisse superar os problemas técnicos da medição da longitude.

Devido às diferenças horárias que ocorrem quando se viaja de leste para oeste ao longo do globo, a longitude pode ser medida comparando o tempo local no mar, digamos ao meio-dia, com o mesmo tempo num outro sítio bem conhecido, por exemplo Greenwich, em Londres. Greenwich fica a zero graus de longitude porque o tempo era anotado relativamente ao observatório que lá está; hoje em dia chamamos-lhe Hora de Greenwich. Até aqui tudo bem, mas como é que se poderia saber quais são as horas em Greenwich quando se está no meio do Atlântico? Hoje em dia é simples: quando voamos de Londres para Nova Iorque levamos connosco um relógio com a hora de Londres. Mas no começo do século XVIII fazer isto não era nada fácil. A tecnologia dos relógios da altura não estava tão avançada, e os relógios mais avançados incorporavam pêndulos que eram inúteis num barco a balouçar. John Harrison, um construtor de relógios britânico, inventou novos aparelhos que utilizavam pesos pendurados

“Se vi mais longe, foi por estar apoiado nos ombros de gigantes.”

Isaac Newton, 1675

numa carta (possivelmente sarcástica) a Hooke

em molas em vez de pêndulos oscilantes. Mas nos testes em mar alto estas novas máquinas não impressionaram ninguém. Um dos problemas em utilizar molas para marcar o tempo é que as suas deformações variam com a temperatura. Para barcos que estavam a navegar dos trópicos até aos pólos, isto tornava esses relógios pouco práticos.

Harrison inventou uma solução inovadora. Ele incorporou no relógio uma tira bi-metálica, feita de dois metais diferentes aglomerados um ao outro. Os dois metais, por exemplo latão e aço, expandem-se de forma diferente à medida que aquecem, o que faz com que a tira se dobre. Uma vez incorporada no mecanismo do relógio, esta tira compensava as mudanças de temperatura. O novo relógio de Harrison, chamado de cronómetro, ganhou a recompensa em dinheiro e resolveu o problema da longitude.

Todos os quatro relógios experimentais de Harrison estão hoje no Observatório de Greenwich, em Londres. Os três primeiros são muito grandes, feitos de bronze e exibindo mecanismos de molas complicadíssimos. São construções lindíssimas, e é um prazer vê-los. O quarto, o *design* vencedor, é muito mais compacto e parece ser nada mais do que um grande relógio de bolso. É esteticamente menos agradável, mas mais preciso. Relógios similares foram usados durante muitos anos no mar alto, até à chegada do relógio electrónico de quartzo.

Hooke Hooke alcançou tanto que chegaram a chamar-lhe o Leonardo da Vinci de Londres. Foi um elemento crucial na revolução científica, tendo contribuído para muitas áreas da ciência, desde a astronomia à biologia, e até para a arquitectura. Teve disputas com Isaac Newton que ficaram famosas, tendo os dois cientistas desenvolvido uma animosidade mútua considerável. Newton ficou zangado por Hooke se recusar a aceitar a sua teoria da cor, e nunca deu crédito a Hooke por ter sugerido a teoria do inverso do quadrado da gravidade.

Parece surpreendente que, apesar de todos estes triunfos, Hooke não seja mais conhecido. Não restam nenhuns retratos seus, e a própria lei de Hooke é um registo modesto para um homem tão inovador.

a ideia resumida
Elástico fantástico

08 A lei dos gases ideais

A pressão, o volume e a temperatura de um gás estão todos relacionados entre si, e a lei dos gases ideais diz-nos como. Se aquecerem um gás, ele quer expandir-se; se o comprimirem, ele ocupa menos espaço mas fica a uma pressão maior. A lei dos gases ideais é bem conhecida pelos passageiros aéreos que têm arrepios só de pensar no ar extremamente frio que está fora do avião, ou pelos alpinistas que contam com uma queda de temperatura e de pressão quando estão a escalar uma montanha. Charles Darwin pode até ter chegado a culpar a lei dos gases ideais por não ter conseguido cozer as suas batatas quando estava a acampar a grandes altitudes nos Andes.

A lei dos gases ideais escreve-se da seguinte maneira: $PV = nRT$, onde P é a pressão, V é o volume, T é a temperatura e n é o número de moles de gás (onde 1 mole contém 6×10^{23} , o número de Avogadro, átomos) e R é um número a que se chama a constante do gás.

Se alguma vez utilizaram uma panela de pressão, já usaram a lei dos gases ideais para cozinhar a vossa refeição. Como é que as panelas de pressão funcionam? São tachos herméticos que impedem perdas de vapor durante o cozinhado. Como o vapor não escapa, à medida que a água ferve o vapor extra que é gerado acumula-se e aumenta a pressão dentro da panela. A pressão pode tornar-se alta o suficiente para impedir que a água ferva, deixando de produzir mais vapor e permitindo que a temperatura da sopa dentro da panela suba para lá do ponto de ebulição normal da água, 100 graus Celsius. Isto faz com que a comida fique cozinhada mais depressa, conservando o seu sabor.

Cronologia

c. 350 A.C.

Aristóteles declara que «a natureza tem horror ao vazio»

1650 D.C.

Otto von Guericke constrói a primeira bomba de vácuo

A lei dos gases ideais, enunciada pela primeira vez pelo físico francês Emil Clapeyron no século XIX, diz-nos a forma segundo a qual a pressão, a temperatura e o volume de um gás estão interligados. A pressão aumenta se o volume é comprimido ou se a temperatura aumenta. Imaginem uma caixa com ar lá dentro. Se reduzissem o volume da caixa para metade, então a pressão iria duplicar. Se aquecessem a caixa original até ela ficar com o dobro da temperatura, então a sua pressão também iria duplicar.

‘Há um simbolismo que inspira esperança no facto de as bandeiras não se agitarem num vácuo.’

Arthur C. Clarke,
nascido em 1917

Ao deduzir a lei dos gases ideais, Clapeyron combinou duas leis prévias, uma devida a Robert Boyle e outra a Jacques Charles e Joseph Louis Gay-Lussac. Boyle tinha observado conexões entre a pressão e o volume, e Charles e Gay-Lussac entre o volume e a temperatura. Clapeyron unificou as três quantidades ao pensar acerca de uma quantidade de gás chamada uma «mole», uma palavra que descreve um certo número de átomos ou de moléculas, nomeadamente 6×10^{23} (ou seja, 6 seguido de 23 zeros), também conhecido como número de Avogadro. Embora isto possa parecer uma carrada de átomos, é mais ou menos o número de átomos que vocês têm na grafite de um lápis. A mole é definida como o número de átomos de carbono-12 em 12 gramas de carbono. Ou se preferirem, se tivessem o número de Avogadro em toranjas, elas iriam ocupar mais ou menos todo o volume da Terra.

Gás ideal Então o que é um gás ideal? Para simplificar, um gás ideal é aquele que obedece à lei dos gases ideais. E isto sucede porque os átomos ou moléculas que o compõem são muito pequenos comparado com as distâncias entre eles, de forma que no seu percurso no gás chocam uns com os outros como bolas de bilhar perfeitas, sem perderem energia nas colisões. E também não existem nestes gases forças extra entre as partículas que pudessem fazer com que elas ficassem agarradas umas às outras, como por exemplo forças eléctricas.

Gases «nobres», como o néon, o argón e o xénon, comportam-se como gases ideais compostos por átomos individuais (e não por moléculas). Moléculas simétricas leves, como as de hidrogénio, azoto ou oxigénio, comportam-se quase como gases ideais, enquanto moléculas mais pesadas, como o gás butano, já quase não o fazem.

1662

A lei de Boyle é estabelecida ($PV = \text{constante}$)

1672

A marmitta de Papin é inventada

1802

A lei de Charles e de Gay-Lussac é estabelecida ($V/T = \text{constante}$)

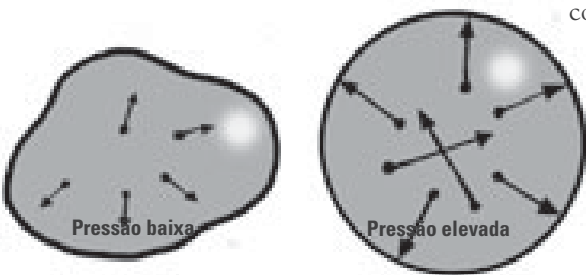
1834

Clapeyron descobre a lei dos gases ideais

Os gases têm densidades muito baixas, e os átomos ou moléculas que os compõem não estão minimamente ligados entre si, sendo praticamente livres de moverem-se à vontade. Nos gases ideais, os átomos comportam-se como milhares de bolas de ténis largadas num recinto de squash, chocando umas contra as outras e contra as paredes da sala. Os gases não têm uma fronteira, mas podem ser contidos num recipiente que define um certo volume. Reduzindo o tamanho desse recipiente fazemos com que as moléculas fiquem mais próximas umas das outras e, de acordo com a lei, isso aumenta quer a pressão quer a temperatura.

A pressão de um gás ideal surge devido às forças que os átomos e as moléculas exercem ao chocarem contra as paredes do recipiente, e uns contra os outros, enquanto andam de um lado para o outro. De acordo com a terceira lei de Newton (ver página 10), as partículas, ao serem reflectidas, exercem uma força oposta nas paredes. As

colisões com as paredes são elásticas, de forma que elas fazem ricochete sem perderem energia e sem ficarem coladas, mas transferem momento para a caixa, o que é sentido como uma pressão. O momento faria com que a caixa se movesse para fora, mas a estrutura da caixa resiste a qualquer movimento, e as forças são exercidas em muitas direcções, de forma que em média cancelam-se mutuamente.



Aumentar a temperatura aumenta também as velocidades das partículas, de maneira que as forças nas paredes tornam-se ainda maiores. A energia do calor é transferida para as moléculas, aumentando a sua energia cinética e fazendo com que elas se movam mais depressa. Quando atingem as paredes, elas transferem ainda mais momento, o que mais uma vez aumenta a pressão.

Reduzir o volume aumenta a densidade do gás, o que faz com que ocorram mais colisões com as paredes, e mais uma vez a pressão sobe. A temperatura também sobe porque, como a energia é conservada, a velocidade das moléculas aumenta quando elas estão num espaço mais restrito.

Alguns gases reais não seguem esta lei à letra. Em gases com moléculas maiores, ou mais complexas, estas podem ter, entre si, forças extra, o que significa que tendem a aglomerar-se mais frequentemente do que sucede num gás ideal. Essas forças de adesão podem surgir devido a cargas eléctricas nos átomos que compõem as moléculas, e tornam-se mais prováveis se o gás estiver altamente comprimido ou muito frio, o que faz com que as moléculas se movam devagar. Moléculas mesmo pegajosas, como proteínas ou gorduras, nunca chegam sequer a tornar-se gasosas.

Pressão e altitude Quando escalam uma montanha na Terra, a pressão atmosférica cai, comparada com a pressão a que estariam ao nível do mar, simplesmente porque passa a haver menos atmosfera por cima de vocês. Poderão já ter notado que isto coincide com uma queda de temperatura. Ao andarem de avião, a temperatura exterior cai para muito abaixo do ponto de congelamento da água. Isto é uma demonstração da lei dos gases ideais.

A grande altitude, porque a pressão atmosférica é baixa, a água ferve a uma temperatura muito mais baixa do que sucede ao nível do mar. Como nessas condições a comida fica mal cozinhada, alguns alpinistas chegam a usar panelas de pressão. Até Charles Darwin chegou a lamentar não ter uma à mão durante as suas viagens aos Andes em 1835, embora ele já conhecesse o «digeridor a vapor» que tinha sido inventado pelo físico francês Denis Papin no final do século XVII.

Darwin escreveu no seu livro *A Viagem do Beagle*: «No sítio em que dormimos a água fervia necessariamente, dada a pressão reduzida da atmosfera, a uma temperatura mais baixa do que acontece numa terra menos elevada; a situação é o inverso de uma marmita de Papin. Daí as batatas, após terem ficado algumas horas na água fervente, estarem quase tão duras quanto de início. A panela ficou na fogueira toda a noite, e na manhã seguinte tornou a ser fervida, mas ainda assim as batatas não foram cozidas. Eu fiquei a saber disto ao ouvir os meus dois companheiros a discutirem a causa eles tinham chegado à simples conclusão «de que a maldita panela [que era nova] tinha-se decidido a não cozer batatas».

Vácuo Se vocês conseguissem voar por cima das montanhas até ao topo da atmosfera, talvez mesmo até ao espaço, a pressão iria cair quase para zero. Um vácuo perfeito não teria átomos nenhuns, mas não existe nenhum sítio do universo em que isso seja verdade. Até mesmo no espaço existem átomos muito dispersos, perfazendo apenas uns quantos átomos de hidrogénio por centímetro cúbico. Os filósofos gregos Platão e Aristóteles não acreditavam que um vácuo puro pudesse existir, visto que «nada» não podia existir.

Hoje em dia, as ideias da mecânica quântica também liquidaram a ideia do vácuo como sendo um espaço vazio, ao sugerirem que esse mesmo espaço está a fervilhar com partículas subatómicas virtuais, materializando-se do nada para desaparecerem logo a seguir. A cosmologia vai até ao ponto de sugerir que o espaço pode ter uma pressão negativa que se manifesta como uma energia escura, provocando a expansão do universo. Parece que a natureza tem mesmo horror ao vazio.

a ideia resumida

Física da panela de pressão

09 A segunda lei da termodinâmica

Esta lei é um dos pilares da física moderna. Afirma que o calor passa dos corpos quentes para os frios, e não ao contrário. Como o calor é uma medição da desordem, ou entropia, outra forma de exprimir este conceito é dizer que a entropia aumenta sempre para um sistema isolado. A segunda lei está directamente relacionada com a progressão do tempo, com o decorrer dos acontecimentos e o destino final do universo.

Quando vocês deitam café quente num copo com gelo, o gelo aquece e derrete e o café é arrefecido. Alguma vez perguntaram a vocês próprios porque é que a temperatura não se torna mais extrema? O café poderia extrair calor do gelo, tornando-se mais quente e fazendo com que o gelo ficasse ainda mais frio. A nossa experiência diz-nos que não é isso que acontece, mas porque é que as coisas são assim?

A tendência que corpos quentes e frios têm para trocar calor e tenderem para uma temperatura igual está resumida na segunda lei da termodinâmica. Ela afirma que, no global, o calor não pode fluir de um objecto frio para outro quente.

Então como é que os frigoríficos funcionam? Como é que conseguimos arrefecer um copo de sumo de laranja se não conseguimos transferir o seu calor para outra coisa? A segunda lei só nos permite fazer isto em circunstâncias especiais. Como produto residual de serem capazes de arrefecer coisas, os frigoríficos também geram uma data de calor, como é

Cronologia

1150 D.C.

Bhaskara propõe uma roda de movimento perpétuo

1824

Sadi Carnot estabelece as fundações da termodinâmica

fácil de confirmar se puserem a vossa mão por trás de um deles. Como os frigoríficos libertam calor, não violam de facto a segunda lei, se vocês olharem para a energia total do frigorífico e da sua vizinhança.

Entropia O calor é na verdade uma medida da desordem e, em física, a desordem é frequentemente quantificada como «entropia», que mede as maneiras segundo as quais uma dada quantidade de coisas se conseguem arranjar. Um pacote de esparguete cru, que é como quem diz um feixe de varetas de pasta todas alinhadas, tem entropia baixa porque exhibe uma grande ordem. Quando vocês atiram o esparguete para dentro de um tacho com água a ferver e a pasta se mistura toda, ele fica mais desordenado e, portanto, tem maior entropia. Do mesmo modo, fileiras bem ordenadas de soldados de brincar têm entropia pequena, mas a sua distribuição tem uma entropia maior se vocês os espalharem todos pelo chão.

O que é que isto tem a ver com frigoríficos? Uma outra maneira de enunciar a segunda lei da termodinâmica é que, para um sistema fechado, a entropia aumenta; ela nunca diminui. A temperatura está directamente relacionada com a entropia, e corpos frios têm pouca entropia. Os seus átomos estão menos desordenados do que os de corpos quentes, que se agitam muito mais. De forma que as mudanças na entropia de um sistema, considerando todas as suas componentes, têm de produzir um efeito global, que se traduz sempre num aumento.

No caso do frigorífico, arrefecer o sumo de laranja diminui a sua entropia, mas isso é compensado pelo ar quente que o electrodoméstico está a produzir. De facto, o aumento de entropia do ar quente até excede qualquer diminuição devida ao arrefecimento do sumo. Outra maneira de enunciar a segunda lei é que a entropia nunca diminui.

A segunda lei é verdadeira para um sistema isolado, ou seja, um sistema selado em que não existe nenhum fluxo para dentro ou para fora de energia. Nesse sistema a energia conserva-se. O universo inteiro é um sistema isolado, no sentido em que não existe nada fora dele, por definição. De forma que, para o universo como um todo, a energia conserva-se e a entropia tem sempre de aumentar. Regiões pequenas poderão sentir um pequeno decréscimo de

«Da mesma forma que o aumento constante de entropia é a lei básica do universo, também é a lei básica da vida que se seja cada vez mais estruturado para se lutar contra a entropia.»

Václav Havel, 1977

1850

Rudolf Clausius define a entropia e a 2.ª lei

1860

Maxwell postula a existência do seu demónio

2007

Leigh afirma ter construído uma máquina-demónio

A (falta de) moda do universo

Os astrónomos tentaram recentemente calcular a cor média do universo, somando toda a luz das suas estrelas, e descobriram que não é amarelo brilhante ou rosa, ou sequer azul pálido, mas antes um bege bastante deprimente. Daqui a biliões de anos, quando a entropia finalmente vencer a gravidade, o universo ir-se-á tornar um mar bege uniforme.

entropia, como acontece quando há arrefecimento, mas isto tem de ser compensado, como sucede com o frigorífico, por outras regiões que aquecem e criam mais entropia, de forma que o total aumenta.

Qual é o aspecto de um aumento de entropia? Se vocês deitarem chocolate derretido para um copo de leite, a coisa começa com baixa entropia; o leite e o chocolate são dois blocos bem distintos, um branco e o outro castanho. Se vocês aumentarem a

desordem agitando o copo, as moléculas misturam-se umas com as outras. O resultado final de desordem máxima acontece quando o chocolate derretido está completamente misturado com o leite e o copo fica com uma tonalidade castanha-clara.

Pensando mais uma vez no universo inteiro, a segunda lei implica, pela mesma ordem de ideias, que os átomos se tornam progressivamente mais desordenados com o passar do tempo. Quaisquer blocos de matéria irão dispersar-se lentamente até que o universo esteja preenchido com os seus átomos. De forma que o destino eventual do universo, que começa com uma tapeçaria multicolorida de estrelas e de galáxias, é um mar cinzento de átomos misturados. Quando o universo se tiver expandido tanto que as galáxias sejam despedaçadas e a sua matéria fique diluída, tudo aquilo que vai restar é uma sopa bem misturada de partículas. Este estado final, assumindo que o universo continua a expandir-se, é conhecido como «morte térmica».

Movimento perpétuo Visto que o calor é uma forma de energia, ele pode ser posto a trabalhar. Uma máquina a vapor converte calor no movimento mecânico de um pistão ou de uma turbina, que pode depois produzir electricidade. Muita da ciência da termodinâmica foi desenvolvida no final do século XIX devido às necessidades práticas da engenharia dos motores a vapor, em vez de ter sido deduzida por físicos em cálculos em papel. Outra implicação da segunda lei é que os motores a vapor, e outros mecanismos que funcionam graças à energia, do calor, não são perfeitos. Em qualquer processo em que o calor é transformado noutro tipo de energia, há sempre alguma energia que se perde, de forma que a entropia do sistema, no seu global, aumenta.

A ideia de uma máquina de movimento perpétuo, um mecanismo que nunca perde energia e consegue funcionar para sempre, tem vindo a tantalizar os cientistas desde os tempos da Idade Média. A segunda lei da termodinâmica escavacou as suas esperanças, mas antes de ela ser conhecida houve muitos cientistas que propuseram esquemas de máquinas possíveis. Robert

Boyle imaginou uma tigela que se esvaziava e enchia a si mesma, e o matemático indiano Bhaskara propôs uma roda que impelia a sua própria rotação deixando cair pesos ao longo dos seus raios à medida que rolava. Na realidade, se olharmos com um pouco mais de atenção, ambas as máquinas perdem energia. Ideias como estas eram tão comuns que no século XVIII as máquinas de movimento perpétuo arranjaram uma fama péssima. Hoje em dia elas estão limitadas aos inventores amadores muito excêntricos.

O demónio de Maxwell Uma das tentativas mais polémicas de violar a segunda lei foi proposta sob a forma de uma experiência conceptual pelo físico escocês James Clerk Maxwell, nos anos 1860. Imaginem duas caixas de gás, uma ao lado da outra, ambas à mesma temperatura. Põe-se um buraco muito pequeno entre as caixas, de tal forma que partículas de gás possam passar de uma caixa para a outra. Se um dos lados estivesse mais quente que o outro, as partículas iriam passar pelo buraco até que a temperatura se igualasse. Maxwell imaginou que havia um pequeno demónio, um diabinho microscópico, que conseguia agarrar apenas as moléculas rápidas de uma caixa e empurrá-las para a outra. Desta forma, a velocidade média das moléculas nessa caixa iria aumentar às custas da outra. Então, postulou Maxwell, o calor poderia ser movido da caixa mais fria para a mais quente. Este processo não violaria a segunda lei da termodinâmica? Poderia o calor ser transferido para o corpo mais quente seleccionando as moléculas correctas?

Arranjar uma explicação para que o demónio de Maxwell não pudesse funcionar tem sido um quebra-cabeças que tem preocupado os físicos desde a proposta inicial. Muitos defenderam que o processo de medir a velocidade das partículas e abrir e fechar qualquer alçapão entre as caixas iria requerer trabalho e, portanto, energia, de forma que isso significaria que a entropia total do sistema não iria diminuir. O mais próximo que alguém já chegou de uma «máquina-demónio» foi o trabalho à nano-escala do físico de Edimburgo David Leigh. A sua criação separou de facto partículas rápidas das lentas, mas precisa de uma fonte de energia externa para o fazer. Visto que não existe nenhum mecanismo capaz de mover partículas sem usar energia extra, mesmo os físicos de hoje em dia não conseguem arranjar uma maneira de violar a segunda lei. Até agora, pelo menos, ela está de pedra e cal.

Outra visão das leis da termodinâmica

Primeira lei

Não podem ganhar

(ver «A conservação da energia», página 20).

Segunda lei

Só podem perder

(ver página 36).

Terceira lei

Não podem sair do jogo

(ver «O zero absoluto», página 140).

a ideia resumida

Lei da desordem

10 O zero absoluto

O zero absoluto é um ponto imaginário em que uma substância é tão fria que os seus átomos deixam de mexer-se. O verdadeiro zero absoluto nunca foi atingido, nem na natureza nem no laboratório. Mas os cientistas já chegaram muito próximo dele. Pode ser impossível atingir o zero absoluto, e mesmo que o tivéssemos alcançado poderíamos não saber, porque nenhum termómetro seria capaz de o medir.

Quando medimos a temperatura de qualquer coisa, estamos a registar a energia média das partículas que a compõem. A temperatura indica quão rapidamente as partículas estão a vibrar, ou a moverem-se de um lado para o outro. Num gás ou num líquido, as moléculas têm a liberdade de mover-se em todas as direcções, e colidem umas com as outras com frequência. De forma que a temperatura está relacionada com a velocidade média das partículas. Num sólido, os átomos estão ancorados a uma estrutura em rede, como peças de Lego juntas umas às outras por ligações electrónicas. Quando esta estrutura aquece, os átomos ganham energia e abanam imenso, como gelatina a tremer, embora continuem nas suas posições.

À medida que vocês arrefecem um material, os seus átomos movem-se menos. Num gás, as suas velocidades diminuem; num sólido, as suas vibrações reduzem-se. À medida que a temperatura diminui mais e mais, os átomos mexem-se cada vez menos. Se for arrefecida o suficiente, uma substância poderia ficar tão fria que os seus átomos deixavam de se mover completamente. A este ponto hipotético de imobilidade chama-se zero absoluto.

Escala de Kelvin A ideia do zero absoluto foi introduzida no século XVIII ao extrapolar um gráfico da temperatura e da energia para zero. A energia

Cronologia

1702 d.c.

Guillaume Amontons propõe a ideia de zero absoluto

1777

Lambert propõe uma escala absoluta de temperatura

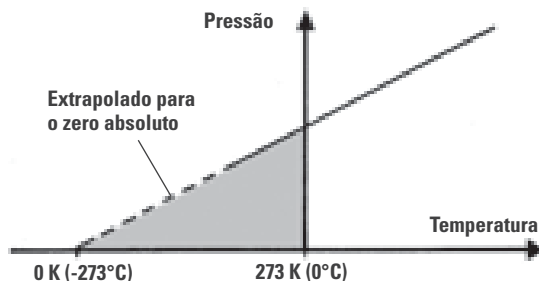
1802

Gay-Lussac identifica o zero absoluto como estando a -273 graus Celsius

cresce rapidamente com a temperatura, e a linha que liga ambas as quantidades pode ser projectada para trás para encontrar a temperatura à qual a energia chega a zero: -273,15 graus Celsius, ou -459,67 graus Fahrenheit.

No século XIX, Lord Kelvin propôs uma nova escala de temperatura que começava no zero absoluto. Na realidade, a escala de Kelvin tomou a escala de temperatura Celsius e deslocou-a. Por isso, em vez da água congelar a 0 graus Celsius, fá-lo a 273 Kelvins e ferve a 373 Kelvins (equivalente a 100 graus Celsius). Os limites superiores desta escala estão determinados, tal como está o ponto triplo da água, a temperatura (a uma dada pressão específica) em que água, vapor e gelo podem coexistir, o que ocorre a 273,16 Kelvins ou 0,01 Celsius a baixa pressão (menos de 1% da pressão atmosférica). Hoje em dia, a maior parte dos cientistas usa Kelvins para medir temperaturas.

Muito frio Quão frio é o zero absoluto? Sabemos aquilo que sentimos quando a temperatura lá fora chega ao ponto de congelamento da água, ou quando começa a nevar. O vosso hálito congela e os vossos dedos começam a ficar dormentes. Isso já é frio que chegue. Partes da América do Norte e da Sibéria podem atingir, no Inverno, 10 ou 20 graus abaixo disto, e no Pólo Sul pode chegar-se aos -70 graus Celsius. A temperatura natural mais fria que já se sentiu na Terra foi uns gélidos -89 graus Celsius, ou 184 Kelvins, testemunhados em Vostok, no coração da Antárctida, em 1983.



“Como gosto de manter os meus gelados no zero absoluto, uso Kelvin mais do que a maior parte dos americanos. Em minha opinião as sobremesas não são deliciosas a menos que estejam completamente privadas de movimentos moleculares.”

Chuck Klosterman, 2004

1848

É definida a escala Kelvin da temperatura

1900

Kelvin dá a sua palestra das «duas nuvens»

1930

Medições experimentais localizam o zero absoluto com uma precisão maior

1954

O zero absoluto é definido oficialmente como sendo -273,15 graus Celsius

A temperatura também cai a pique se vocês escalarem uma montanha ou voarem bem alto na atmosfera com um avião. Se forem para o espaço, fica ainda mais frio. Mas mesmo nos confins mais vazios do espaço os átomos mais frios têm temperaturas uns poucos graus acima do zero absoluto. O ambiente mais frio que se encontrou até hoje no universo fica dentro da Nebulosa do Boomerang, uma nuvem de gás escura que está só um grau acima do zero absoluto.

Fora desta nebulosa, e através do espaço vazio, a temperatura ambiente é de uns relativamente temperados 2,7 Kelvins. Este banho tépido é devido à radiação cósmica do fundo de microondas, um calor residual do próprio *big bang*, que permeia todo o espaço (ver a página 182). Para uma dada região ficar mais fria, é preciso protegê-la deste calor de fundo e quaisquer átomos deverão ter perdido o seu calor residual. De forma que é praticamente inconcebível que exista um sítio qualquer no espaço que esteja verdadeiramente no zero absoluto.

Fresquinho cá dentro Em laboratório conseguiram alcançar-se temperaturas ainda mais baixas, em situações em que os físicos tentaram aproximar-se, durante breves períodos de tempo, do zero absoluto. Eles têm chegado muito próximo, muito mais próximo do que se atinge no espaço.

Nos laboratórios usam-se muitos gases líquidos como arrefecedores, mas ainda assim eles estão mais quentes do que o zero absoluto. É possível arrefecer azoto até ele se tornar num líquido, o que ocorre a 77 Kelvin (-196 graus Celsius). O azoto líquido é fácil de transportar em cilindros e é utilizado em hospitais para preservar amostras biológicas, incluindo congelar embriões e

“Durante a primeira metade da carreira de Thomson ele parecia ser incapaz de estar errado, enquanto durante a segunda metade da sua carreira ele parecia incapaz de estar certo.”

C. Watson, 1969

(biógrafo de Lord Kelvin)

esperma em clínicas de fertilidade, e também é usado em electrónica avançada. Quando se mergulha uma flor de cravo em azoto líquido, ela torna-se tão quebradiça que se parte, como porcelana, quando a deixamos cair no chão.

O hélio líquido é ainda mais frio, só 4 Kelvins, mas ainda assim bem acima do zero absoluto. Juntando dois tipos de hélio, hélio-3 e hélio-4, é possível arrefecer essa mistura até uns poucos milésimos de Kelvin.

Para se atingirem temperaturas ainda mais baixas, os físicos precisam de tecnologia ainda mais

inteligente. Em 1994, no American National Institute for Standards and Technology (NIST), em Boulder, no Colorado, os cientistas conseguiram arrefecer átomos de cézio usando *lasers*, até eles atingirem uma temperatura 7 décimas de milionésimas acima do zero absoluto. Nove

LORD KELVIN 1824–1907

O físico britânico Lord Kelvin, nascido William Thomson, dedicou-se a muitos problemas de electricidade e de calor, embora seja mais conhecido por ter ajudado a construir o primeiro cabo submarino transatlântico para a transmissão de telégrafos. Thomson publicou mais de 600 artigos e foi eleito presidente da prestigiada Royal Society de Londres. Era um físico bastante conservador e recusava-se a aceitar a existência de átomos, opunha-se às teorias da evolução de Darwin e às teorias com ela relacionadas acerca das idades da Terra e do Sol, o que o colocava no lado derrotado de muitas discussões. Thomson foi nomeado barão Kelvin of Largs, devido ao rio Kelvin

que passa através da Universidade de Glasgow e à sua terra natal de Largs, na costa escocesa. Em 1900, Kelvin deu uma palestra que ficou famosa na Royal Institution da Grã-Bretanha, onde lamentou o facto de a «beleza e clareza da teoria» serem obscurecidas por «duas nuvens», nomeadamente a então fracassada teoria da radiação do corpo negro e a tentativa falhada de observar um «éter», um meio gasoso através do qual se assumia que a luz viajava. Os dois problemas que ele destacou viriam mais tarde a ser tratados pela teoria quântica e pela relatividade, mas Thomson continuou a lutar para resolvê-los com a física newtoniana dos seus dias.

anos mais tarde, cientistas do Massachusetts Institute of Technology foram ainda mais longe, alcançando as 0,5 milésimas de milionésimas de Kelvin.

Na realidade, o zero absoluto é uma ideia abstracta. Nunca foi conseguido em laboratório e nunca foi medido na natureza. Enquanto tentam aproximar-se cada vez mais, os cientistas têm de aceitar que pode bem ser impossível alguma vez alcançar, com certeza, o zero absoluto.

E qual o porquê disto? Primeiro que tudo, qualquer termómetro que não estivesse, ele mesmo, no zero absoluto, iria adicionar calor e, portanto, arruinar a obtenção do zero absoluto. Em segundo lugar, é difícil medir temperaturas a energias tão baixas, situações em que outros efeitos, como a supercondutividade e a mecânica quântica intervêm e afectam os movimentos e estados dos átomos. De forma que podemos nunca saber ao certo se conseguimos lá chegar. Para o zero absoluto, pode bem dar-se o caso de não haver nada de nada no lugar da meta.

a ideia resumida
muito frio

11 O movimento browniano

O movimento browniano descreve os movimentos bruscos de pequenas partículas à medida que são empurradas por moléculas invisíveis de água ou de gás. Foi o botânico Robert Brown quem o observou pela primeira vez, sob a forma de tremeliques de partículas de pólen nas suas lamelas de microscópio molhadas, mas foi Albert Einstein quem o descreveu matematicamente. O movimento browniano explica como é que a poluição se difunde através do ar imóvel e descreve muitos processos aleatórios, desde as cheias até ao mercado das acções. Os seus passos imprevisíveis estão relacionados com os fractais.

Robert Brown, um botânico do século XIX, estava a olhar para grãos de pólen num microscópio quando se deu conta que eles não estavam imóveis, antes tinham movimentos bruscos de um lado para o outro. Por um momento ele perguntou-se se não estariam vivos. Era óbvio que não estavam, e o que estava a suceder era que os grãos de pólen estavam a ser atirados de um lado para o outro pelos movimentos das moléculas da água que Brown tinha usado nas lamelas do microscópio. As partículas de pólen moviam-se em direcções aleatórias, por vezes pouco e ocasionalmente imenso, e deslizavam gradualmente ao longo de toda a lamela seguindo trajectórias que não podiam ser previstas. Outros cientistas intrigaram-se com a descoberta de Brown que, em sua honra, foi baptizada de movimento browniano.

Cronologia

c. 420 A.C.

Demócrito postula a existência de átomos

1827 D.C.

Brown observa o movimento do pólen e propõe o mecanismo

Passeio aleatório O movimento browniano acontece porque cada pequena partícula de pólen leva um empurrão minúsculo sempre que choca contra uma molécula de água. As moléculas de água invisíveis estão a mover-se de um lado para o outro e a colidirem entre si continuamente, de forma que vão de encontro ao pólen com frequência, obrigando-o a deslocar-se. Embora o grão de pólen seja centenas de vezes maior do que uma molécula da água, como o pólen é atingido, a cada instante, por imensas moléculas, cada uma a mover-se numa direcção aleatória, regra geral acaba por aparecer um desequilíbrio de forças que faz com que ele se mova um pouco. Isto sucede vezes sem conta e por isso o grão de pólen bombardeado segue uma trajectória acidentada, quase como o percurso de um bêbado a arrastar-se. O caminho do pólen não pode ser previsto de antemão porque as moléculas de água colidem com ele de forma aleatória, e por isso o grão pode ser atirado em qualquer direcção.

O movimento browniano afecta quaisquer partículas pequenas que estejam suspensas num líquido ou gás. Até partículas muito grandes, como por exemplo partículas de fumo que estão a deslizar ao longo do ar, exibem este movimento, o que se pode ver com uma lupa. O tamanho dos empurrões que a partícula leva depende do momento das moléculas. De forma que se observa um bombardeamento tanto maior quanto mais pesadas forem as moléculas do líquido ou gás, ou quanto mais rápidas elas forem, o que acontece, por exemplo, se o fluido estiver quente.

A formulação matemática por trás do movimento browniano foi desenvolvida no final do século XIX, mas foi Einstein quem o trouxe à atenção dos físicos no seu artigo de 1905, o mesmo ano em que publicou a sua teoria da relatividade e uma explicação do efeito fotoeléctrico, que lhe haveria de granjear o Prémio Nobel. Einstein tomou de empréstimo a teoria do calor, que também se baseava em colisões moleculares, para explicar, de forma bem-sucedida, o tipo exacto de movimentos que Brown observara. Ao verem que o movimento browniano fornecia uma prova para a existência de moléculas em fluidos, os físicos foram obrigados a aceitar a teoria dos átomos, que ainda estava a ser posta em causa, mesmo nos inícios do século XX.



«O “passeio aleatório” do movimento browniano»

1905

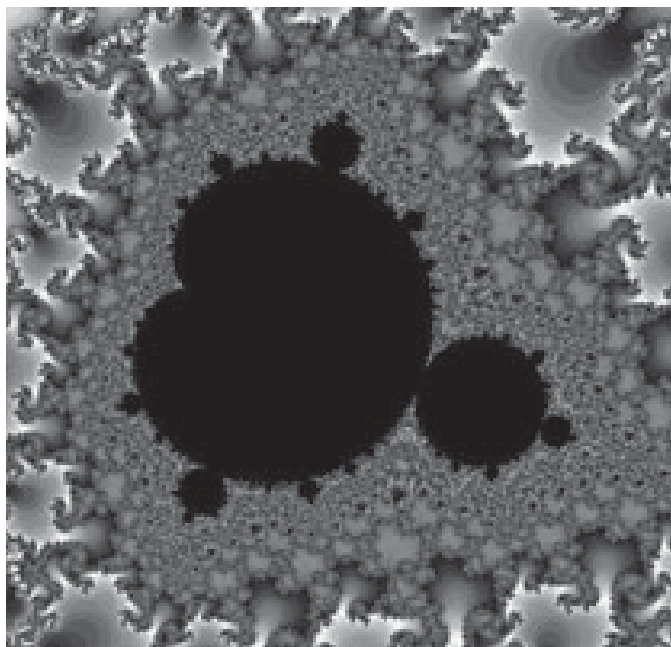
Einstein determina a formulação matemática por trás do movimento browniano

Anos 1960

Mandelbrot descobre os fractais

Difusão Dado tempo suficiente, o movimento browniano pode fazer com que as partículas se desloquem distâncias consideráveis, mas nunca tão longe como se estivessem a deslocar-se sem obstáculos e em linhas rectas. Isto acontece porque a aleatoriedade do movimento faz, com igual probabilidade, com que a partícula volte para trás ou ande para a frente. De forma que, se se largar um grupo de partículas num dado sítio de um líquido, ele irá difundir-se em todas as direcções mesmo que ninguém agite ou mesmo que não haja correntes no líquido. Cada uma das partículas sairia disparada à sua própria maneira, fazendo com que a gota concentrada se espalhasse, formando uma nuvem difusa. Este tipo de difusão é importante para a disseminação da poluição desde a sua fonte original, como acontece com os aerossóis na atmosfera. Mesmo que não haja ventos, os produtos químicos irão difundir-se, graças apenas ao movimento browniano.

Fractais O percurso seguido por uma partícula com movimento Browniano é um exemplo de um fractal. Cada passo desse percurso pode ter um tamanho qualquer e apontar em qualquer direcção, mas há um padrão global que emerge ao fim de algum tempo. Este padrão tem estrutura dentro de si a qualquer escala, desde a mais pequena escala imaginável até modulações bastante grandes. Esta é a principal característica que define um fractal.



Os fractais foram definidos por Benoit Mandelbrot nos anos de 1960 e 70 como uma maneira de quantificar formas auto-similares. Fractal é uma abreviação para dimensão fraccionária, e é um padrão que parece ser essencialmente o mesmo a qualquer escala. Se vocês olharem mais de perto para um pequeno pedaço do padrão, ele parece indistinguível daquilo que era a uma escala maior, de forma que é impossível determinar a amplificação simplesmente olhando para o objecto. Estes padrões repetidos e desprovidos de escala aparecem frequentemente na natureza, por exemplo nos acidentes de

uma linha costeira, nos ramos de uma árvore, nas folhas de um feno ou na simetria hexagonal de um floco de neve.

As dimensões fraccionárias surgem porque o seu comprimento, ou dimensão, depende da escala à qual vocês estão a olhar. Se medirem a distância entre duas cidades ao longo da costa, poderiam dizer que Land's End está a 30 quilómetros de Mount's Bay, mas se considerarem todas as rochas individualmente e medirem a distância com um pedaço de cordel que dê a volta a todas, é bem provável que precisem de um cordel com 100 quilómetros. Se fossem ainda mais longe e medissem a distância em torno de cada grão de areia da costa, poderiam acabar por precisar de um cordel de centenas de quilómetros. De forma que o comprimento absoluto depende da escala da medição. Se vocês ignorarem a precisão e fizerem a medida a uma escala muito mais grosseira vão regressar aos vossos familiares 30 quilómetros. Neste sentido, as dimensões fractais medem a irregularidade de uma coisa. Muitas destas formas fractais, como por exemplo o contorno de uma linha costeira, podem ser produzidos por uma série de passos de movimentos aleatórios, daí a sua ligação com o movimento browniano.

A formulação matemática do movimento browniano, ou uma sequência de movimentos aleatórios, pode ser utilizada para gerar padrões fractais que são muito úteis em diversas áreas da ciência. Podem criar paisagens acidentadas virtuais e montanhas, árvores e nuvens para jogos de computador ou serem utilizadas em programas de mapeamento espacial que ajudam *robots* a guiarem-se a si mesmos em terrenos acidentados, ao criarem modelos para as suas lombas e fendas. Os médicos acham os fractais muito úteis quando precisam de analisar a estrutura de partes complicadas do corpo, como os pulmões, onde há estruturas ramificadas que se estendem de uma escala grosseira até uma escala muito pequena.

As ideias do movimento browniano também são úteis para se prever riscos e acontecimentos futuros que sejam o resultado somado de muitos acontecimentos aleatórios, como por exemplo as inundações e as flutuações do mercado de valores. O mercado de acções pode ser tratado como um portfólio de acções cujos preços variam aleatoriamente, tal como o movimento browniano de um conjunto de moléculas. O movimento browniano também é relevante para a criação de modelos em outros processos sociais, tais como os processos de fabrico e de tomada de decisões. Os movimentos aleatórios do movimento browniano têm uma influência muito vasta e aparecem sob muitas formas diferentes, e não apenas na dança das folhas numa boa chávena de chá quente.

a ideia resumida

Uma dança microscópica invisível

12 A teoria do caos

A teoria do caos afirma que pequenas mudanças nos acontecimentos podem ter ramificações gigantescas mais tarde. Se saíram de casa 30 segundos mais tarde, apesar de terem acabado por perder o autocarro, podem também ter encontrado alguém que vos pôs no caminho para um emprego novo, alterando para sempre o percurso da vossa vida. A aplicação mas famosa da teoria do caos diz respeito ao clima, onde uma pequena rajada de vento pode semear um furacão do outro lado do planeta, o chamado «efeito borboleta». No entanto, a teoria do caos não é literalmente caótica, visto que dela emergem padrões.

O bater de asas de uma borboleta no Brasil pode provocar um tornado no Texas. Assim diz a teoria do caos. A teoria do caos reconhece o facto de alguns sistemas poderem produzir comportamentos muito diferentes, embora tenham pontos de partida muito parecidos. Um desses sistemas é o clima. Uma alteração minúscula na temperatura ou na pressão num local pode desencadear uma cadeia de acontecimentos posteriores que venham a desencadear uma enxurrada noutra sítio.

Caos é um nome um pouco enganador neste caso. Não estamos a falar de fenómenos caóticos como sendo completamente selvagens, imprevisíveis ou desprovidos de estrutura. Os sistemas caóticos são deterministas, o que significa que se vocês souberem o ponto de partida exacto, eles são previsíveis e também reproduzíveis. A série de eventos que ocorre é descrita por física simples, e essa série é a mesma de cada vez que se repetir a experiência. Mas, se se considerar um resultado final, é impossível voltar

Cronologia

1898 D.C.

Os bilhares de Hadamard exibem comportamento caótico

atrás e dizer de onde é que ele proveio, visto que diversos percursos podem ter levado até ele. E isto porque as diferenças entre as condições que desencadearam um resultado e outro podem ser ínfimas, até impossíveis de medir. Logo, resultados divergentes surgem de pequeníssimas alterações nos parâmetros iniciais. Por causa desta divergência, se existe alguma incerteza nos valores iniciais, então a gama de comportamentos subsequentes pode ser vasta. Em termos do clima, se a temperatura do vento for diferente, mesmo que só por uma fracção de grau, daquilo que vocês pensam que é, as vossas previsões poderão estar completamente erradas e vir a acabar, não com uma tempestade violenta, mas sim com um chuvisco, ou um tornado violentíssimo, na cidade vizinha. Os meteorologistas têm por isso grandes limitações relativamente ao período futuro para o qual conseguem estabelecer modelos para o clima. Mesmo com as enormes quantidades de dados acerca do estado da atmosfera, provenientes de enxames de satélites a orbitar a Terra e estações meteorológicas à sua superfície, os homens do boletim meteorológico só conseguem prever os padrões do clima para uns poucos dias no futuro. Depois desse intervalo, as incertezas tornam-se demasiado grandes devido ao caos.

Desenvolvimento A teoria do caos foi desenvolvida em pleno nos anos 1960 pelo matemático e meteorologista americano Edward Lorenz. Ao usar um computador para trabalhar em modelos do clima, Lorenz reparou que o seu programa produzia padrões climáticos muitíssimo diferentes simplesmente porque os números iniciais que ele tinha fornecido tinham sido arredondados de maneira diferente. Para ajudar aos cálculos, ele tinha partido as suas simulações em pedaços e tentado recomeçá-las a meio imprimindo números e tentando então tornar a digitá-los à mão. Na impressão os números estavam arredondados à terceira casa decimal, que ele digitou, mas a memória do computador estava a lidar com números com seis casas decimais. De forma que, quando 0,123456 foi substituído pelo 0,123 abreviado a meio do cálculo, Lorenz viu que o clima daí resultante era completamente diferente. Erros minúsculos introduzidos pelos arredondamentos do computador tinham tido um efeito importantíssimo na previsão final para o clima. Os modelos em que ele estava a trabalhar eram reprodutíveis, não aleatórios, mas as diferenças eram difíceis de interpretar. Porque é que uma ajustadela tão pequena no seu programa produzia tempo limpo numa simulação, e tempestades catastróficas noutra?

Olhando melhor para os detalhes, ele reparou que os padrões climáticos resultantes estavam limitados a um determinado conjunto, a que ele chamou um atractor. Não era possível produzir qualquer tipo de clima ao variar os números iniciais, havia sim apenas um conjunto de

1961

Trabalhos de Lorenz acerca de previsão climática

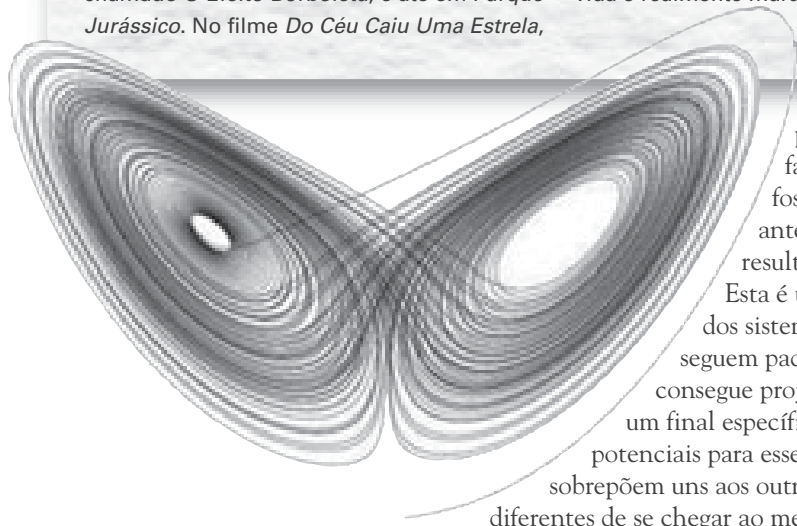
2005

Descobre-se que as luas de Neptuno têm órbitas caóticas

O efeito borboleta

A ideia principal do caos, que mudanças pequenas podem ter mais tarde ramificações enormes, é frequentemente chamada de «efeito borboleta», dado o exemplo de Lorenz de a criatura bater as asas e causar um tornado. Esta ideia, envolvendo também viagens no tempo, tem sido muito usada em filmes e na cultura *pop*, incluindo um filme chamado *O Efeito Borboleta*, e até em *Parque Jurássico*. No filme *Do Céu Caiu Uma Estrela*,

de 1946, um anjo mostra ao personagem principal, George, como a sua cidade natal teria sido um local mais miserável se ele não tivesse nascido. O anjo diz: «Foi-te dado um grande presente, George: uma oportunidade de ver o que o mundo seria sem ti.» George descobre que o simples facto de ter existido salvou um homem de se afogar, e que a sua vida é realmente maravilhosa.



padrões de tempo que era favorecido, ainda que fosse difícil prever com antecipação qual deles iria resultar dos números iniciais.

Esta é uma propriedade básica dos sistemas caóticos – eles seguem padrões globais mas não se consegue projectar para trás no tempo um final específico, porque há percursos potenciais para esse resultado que se sobrepõem uns aos outros. Há muitas formas diferentes de se chegar ao mesmo resultado.

As ligações entre o início e o resultado final podem ser apresentadas num gráfico que mostra a gama de comportamentos que um dado sistema caótico pode exibir. Um gráfico desses mapeia as soluções atractoras, a que por vezes nos referimos como «atractores estranhos». Um exemplo famoso é o atractor de Lorenz, que se parece com uma série de desenhos de oito sobrepostos, mas ligeiramente deslocados e torcidos uns relativamente aos outros, em forma de borboleta.

A teoria do caos surgiu na altura em que se descobriu os fractais. De facto, ambos estão intimamente ligados. Os mapas de atractores das soluções caóticas de muitos sistemas podem ter a aparência de fractais, em que a estrutura fina do atractor se repete a muitas escalas.

Exemplos iniciais Embora a disponibilidade de computadores tenha sido aquilo que realmente permitiu o desenvolvimento da teoria do caos, tendo permitido aos matemáticos calcularem muitas vezes os comportamentos de sistemas variando os números iniciais, houve sistemas mais simples que mostraram ter comportamento caótico, e isso foi reconhecido desde muito cedo. Por exemplo, no final do século XIX já se sabia que o caos se aplicava às trajectórias das bolas de bilhar e às estabilidades das órbitas.

Jacques Hadamard estudou a matemática do movimento de uma partícula numa superfície curva, como por exemplo uma bola num campo de golfe, estudo esse que ficou conhecido como bilhares de Hadamard. Em algumas superfícies, as trajectórias das partículas tornavam-se instáveis, e elas saltavam para fora do tabuleiro de bilhar. Outras ficavam lá dentro mas seguiam trajectórias variáveis. Pouco depois, Henri Poincaré também descobriu soluções não-repetíveis para as órbitas de três corpos sob o efeito da gravidade, como a Terra com duas luas, mais uma vez vendo órbitas que eram instáveis. Os três corpos orbitavam uns em torno dos outros seguindo curvas sempre diferentes, mas a sua união não se quebrava. Os matemáticos tentaram então desenvolver esta teoria de movimentos de muitos corpos, conhecida por teoria ergódica, e aplicá-la a fluidos turbulentos e oscilações eléctricas em circuitos de rádio. Desde os anos 1950, a teoria do caos desenvolveu-se rapidamente à medida que foram sendo descobertos novos sistemas caóticos e os computadores começaram a ser usados para facilitar os cálculos. ENIAC, um dos primeiros computadores, foi usado para previsão do clima e para investigar o caos.

O comportamento caótico é muitíssimo comum na natureza. Além de afectar o tempo e outros fluxos de fluidos, o caos ocorre em sistemas de muitos corpos, incluindo as órbitas dos planetas. Neptuno tem mais de uma dúzia de luas. Em vez delas seguirem as mesmas órbitas ano após ano, o caos faz com que sofram ricochetes em órbitas instáveis que mudam todos os anos. Alguns cientistas pensam que a disposição ordeira do nosso sistema solar pode, em última análise, ser devida ao caos. Se os nossos planetas, e outros, estiveram envolvidos num gigantesco jogo de bilhar há mil milhões de anos, jogo esse que sacudiu todas as órbitas até que os corpos instáveis se perderam para sempre, então o padrão de planetas estável que observamos hoje em dia é aquilo que sobejou desse jogo.

“O Harry não estava lá para salvar as pessoas porque tu não estavas lá para salvar o Harry! Estás a ver, George: tu tiveste uma vida maravilhosa. Não vês o erro que seria deitá-la fora?”

Do Céu Caiu Uma Estrela, 1946

a ideia resumida
Ordem no caos

13 A equação de Bernoulli

A relação entre a velocidade e a pressão de líquidos em fluxo é dada pela equação de Bernoulli. Ela explica porque é que os aviões voam, como é que o sangue flui através dos nossos corpos e de que maneira é que o combustível é injectado nos motores dos carros. Fluidos em fluxo rápido criam baixas pressões, o que explica como é que as asas dos aviões os mantêm no ar e porque é que o jacto de água que sai de uma torneira é estreito. Usando este efeito para medir a pressão arterial, Daniel Bernoulli inseriu tubos directamente nas veias dos seus doentes.

Quando abrem uma torneira, a coluna de água que sai dela é mais estreita do que a espessura da torneira propriamente dita. Porquê? E como é que isso está relacionado com a razão pela qual os aviões voam, ou com angioplastias?

O físico e médico holandês Daniel Bernoulli compreendeu que a água em movimento cria uma pressão baixa. Quanto mais rápido flui, mais baixa é a sua pressão. Se imaginarem um tubo de vidro transparente deitado na horizontal com água a correr lá dentro, podem medir a pressão dessa água inserindo um tubo capilar transparente na vertical no primeiro tubo e vendo como é que a altura de água no tubo mais pequeno varia. Se a pressão da água for alta, o nível de água no capilar sobe. Se for baixa, desce.

Cronologia

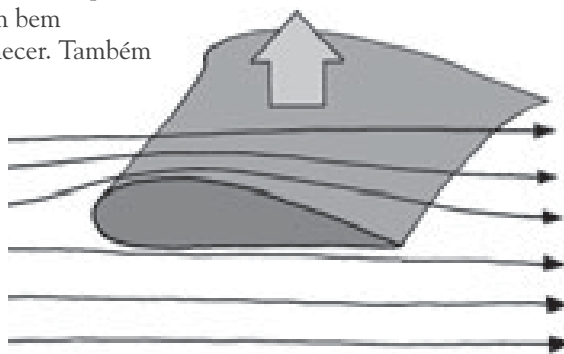
1738 D.C.

Bernoulli descobre que um aumento na velocidade de um fluido provoca uma diminuição da sua pressão

Quando Bernoulli aumentou a velocidade da água no tubo horizontal, ele observou uma queda de pressão no tubo capilar vertical – esta queda de pressão revelou ser proporcional à velocidade da água ao quadrado. De forma que qualquer água em fluxo tem uma pressão mais baixa do que água imóvel. A água que corre de uma torneira tem pressão mais baixa, comparada com o ar imóvel que a rodeia, e por causa disso é comprimida e forma uma coluna estreita. Isto aplica-se a qualquer fluido, da água ao ar.

Fluxo sanguíneo Treinado em medicina, Bernoulli estava fascinado pelo fluxo de sangue através do corpo humano, e inventou uma ferramenta para poder medir a tensão arterial. Um tubo capilar, inserido num vaso sanguíneo, e que foi usado durante quase duas centenas de anos para medir a pressão do sangue em pacientes vivos. Deve ter sido um grande alívio, para toda a gente, quando se descobriu um método menos invasivo.

Tal como a água num cano, o sangue numa artéria é bombeado para longe do coração seguindo um gradiente de pressão que se desenvolve ao longo do vaso sanguíneo. Se uma artéria fica mais estreita, a velocidade do sangue que está a fluir através dessa constrição aumenta de acordo com a equação de Bernoulli. Se a veia tiver metade da espessura, o sangue que flui através dela irá quatro vezes mais depressa (dois ao quadrado). Esta aceleração do fluxo sanguíneo através de artérias semi-obstruídas pode causar problemas. Em primeiro lugar, o fluxo pode tornar-se turbulento, se a sua velocidade for suficientemente elevada, e podem produzir-se remoinhos. Tal turbulência próxima do coração produz murmúrios cardíacos com um som bem característico, que os médicos conseguem reconhecer. Também acontece que a queda de pressão na região estreita pode sugar a parede mole da artéria, agravando ainda mais o problema. Se a artéria for alargada, com uma angioplastia, a quantidade de fluxo sanguíneo vai aumentar de novo e tudo ficará bem.



Ascensão A queda na pressão de fluidos devida à velocidade tem outras consequências importantes. Os aviões voam porque o ar que

1896

É inventada uma técnica não-invasiva para medir a tensão arterial

1903

Os irmãos Wright, com asas inspiradas por Bernoulli, voam no primeiro avião

DANIEL BERNOULLI 1700–82

O físico holandês Daniel Bernoulli completou os seus estudos médicos em Basileia, mas em 1724 tornou-se professor de matemática em São Petersburgo. Ao trabalhar com o matemático Leonhard Euler em fluidos, foi capaz de estabelecer uma ligação entre a velocidade e a pressão ao fazer experiências com tubos, que vieram a

ser utilizados por médicos para medirem a tensão arterial, inserindo-os em artérias. Bernoulli deu-se conta de que o fluxo e a pressão dos fluidos estavam relacionados com a conservação da energia e demonstrou que se a velocidade aumenta a pressão diminui.

está a passar ao longo das suas asas também produz uma queda de pressão. As asas dos aviões têm uma forma específica, tal que a parte superior é mais encurvada que a parte inferior. Devido ao percurso maior na parte de cima, o ar move-se mais depressa sobre a superfície superior do que na parte de baixo. A diferença de pressão dá à asa um empurrão para cima, o que permite que o avião voe. Mas um avião pesado tem de mover-se muito depressa para gerar uma diferença de pressão suficiente para conseguir levantar voo.

Um efeito parecido explica a forma como o combustível é injectado no motor de um carro através de um carburador. Um bocal especial, chamado tubo de venturi (um tubo largo com uma «cintura» mais estreita a meio) produz ar a pressão baixa, restringindo e depois libertando o fluxo, o que suga o combustível e faz assim uma mistura combustível-ar que é depois enviada para o motor.

Conservação Daniel Bernoulli atingiu as suas conclusões pensando acerca da forma como se poderia aplicar a conservação da energia aos fluidos. Os fluidos, em que se incluem líquidos e ar, são substâncias contínuas que podem constantemente ser deformadas. Mas também devem seguir as leis de conservação básicas, não só da energia mas também da massa e do momento. Como qualquer fluido em movimento está essencialmente a rearranjar constantemente os átomos que o constituem, estes átomos têm de obedecer às leis do movimento derivadas por Newton e outros. De forma que em qualquer descrição que se faça de fluidos os átomos não podem ser criados ou destruídos, apenas movidos de um lado para outro. As suas colisões com outros átomos têm de ser consideradas, e quando tal sucede as suas velocidades são previstas pela conservação do momento linear. A quantidade total de energia acumulada pela globalidade das partículas também deverá ser constante, e só poderá deslocar-se através do sistema, não podendo variar.

Estas leis físicas são usadas hoje em dia para descrever o comportamento de fluidos tão diferentes quanto padrões climáticos, correntes oceânicas, a circulação de gases em estrelas e galáxias e o fluxo de fluidos nos nossos corpos. A previsão meteorológica depende de modelos de computador para os movimentos de imensos átomos, juntamente com a termodinâmica, para dar conta de mudanças de calor à medida que os átomos se movem e mudam de densidade, temperatura e pressão numa dada região. Mais uma vez, as mudanças de pressão e de velocidades estão ligadas, visto que fazem com que os ventos fluam de pressões altas para baixas. Estas mesmas ideias foram utilizadas para prever o percurso do furacão Katrina, à medida que se deslocava em direcção à costa americana em 2005.

“Máquinas voadoras mais-pesadas-do-que-o-ar são impossíveis. Não tenho sequer a mais pequena das moléculas de fé em navegação aérea que não seja através de balões, nem nenhuma expectativa de bons resultados em qualquer das tentativas de que ouvimos falar.”

Lord Kelvin, 1895

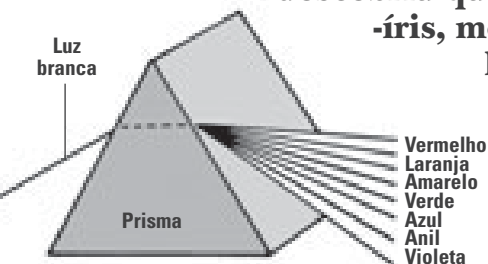
As leis de conservação estão representadas numa série de outras equações chamadas equações de Navier-Stokes, assim baptizadas devido aos cientistas que as descobriram. Estas equações também levam em conta os efeitos da viscosidade dos fluidos, ou seja, o quanto um fluido é pastoso, devido às forças entre as moléculas que o compõem. Lidando com conservação e não com previsões absolutas, estas equações traçam as mudanças na circulação das partículas em média, em vez de seguirem o número total de átomos.

As equações de Navier-Stokes da dinâmica de fluidos, embora sejam suficientemente detalhadas para explicarem muitos sistemas complexos, como fenómenos climáticos incluindo o El Niño e furacões, não são capazes de descrever fluxos muito turbulentos, como a água em queda de uma cascata ou o fluxo de uma fonte. A turbulência é o movimento aleatório de água perturbada, caracterizada por remoinhos e instabilidade. Ela acontece quando os fluxos se tornam demasiado rápidos e se desestabilizam. Como a turbulência é difícil de descrever matematicamente, mesmo hoje em dia continuam a oferecer-se enormes prémios em dinheiro aos cientistas que criem novas equações capazes de descrever estas situações extremas.

a ideia resumida
Artérias e aerodinâmica

14 A teoria da cor de Newton

Já todos nós nos maravilhávamos com a beleza de um arco-íris – mas Isaac Newton explicou como é que eles se formam. Ao fazer passar luz branca através de um prisma de vidro, ele descobriu que ela se separava nos tons do arco-íris, mostrou que as cores faziam parte da



luz branca e que não estavam a ser geradas pelo prisma. A teoria da cor de Newton foi polêmica na altura mas tem, desde então, influenciado gerações inteiras de artistas e cientistas.

Façam com que um feixe de luz branca passe através de um prisma e o raio que dele emerge ir-se-á espalhar num arco-íris de cores. Os arco-íris aparecem no céu pela mesma razão, com a luz do sol a ser separada, por gotículas de chuva, no espectro de tons familiar: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta.

Tudo na mistura Ao fazer experiências com luz e prismas nas suas salas nos anos de 1660, Isaac Newton demonstrou que as muitas cores da luz podiam ser misturadas outra vez para formarem luz branca. As cores eram as unidades de base, em vez de serem produzidas por uma mistura posterior ou pelo próprio prisma de vidro, como se tinha já pensado. Newton isolou feixes de luz vermelha e azul e mostrou que estas cores individuais não se separavam ainda mais se passassem através de outros prismas.

Cronologia

1672 D.C.

Newton explica o arco-íris

Embora a teoria da cor de Newton nos seja tão familiar hoje em dia, ela revelou-se polémica na altura. Os colegas de Newton argumentaram vigorosamente contra ela, preferindo acreditar que as cores surgiam de combinações de luz branca e de escuridão, como um tipo de sombra. As batalhas mais ferozes de Newton foram travadas com o seu contemporâneo igualmente famoso, Robert Hooke. O par de cientistas debateu em público acerca da cor ao longo de todas as suas vidas. Hooke tinha outra opinião, a de que a luz colorida era algo que era conferido, como sucede quando se olha através de vidro colorido. Ele citou exemplos de efeitos pouco usuais de coloração de luz na vida real, e criticou Newton por não ter efectuado mais experiências.

Newton também se deu conta de que os objectos numa sala iluminada aparentam ter cor porque dispersam ou reflectem a luz dessa cor, em vez de a cor ser, de alguma forma, uma qualidade do objecto. Um sofá vermelho reflecte sobretudo luz vermelha, e uma mesa verde reflecte luz verde. Uma almofada cor de turquesa reflecte azul e um pouco de luz amarela. As outras cores emergem de misturas destes três tipos básicos de luz.

Ondas luminosas Para Newton, compreender a cor era uma forma de investigar a física da própria luz. Com mais experiências, ele concluiu que a luz se comportava, em muitos aspectos, como ondas na água. A luz encurva-se em torno de obstáculos de maneira parecida com as ondas do mar em torno da parede de um porto. Também se podem adicionar feixes luminosos uns aos outros para reforçar, ou cancelar, o seu brilho, como sucede com ondas de água sobrepostas. Da mesma maneira que as ondas de água são movimentos a larga-escala de moléculas de água invisíveis, Newton acreditava que as ondas luminosas eram, em última análise, agitações de pequeníssimas partículas de luz, ou «corpúsculos», que eram até mais pequenos do que átomos. O que Newton não sabia é que, como foi descoberto séculos mais tarde, as ondas luminosas são de facto ondas

“A natureza e as leis da natureza permaneciam escondidas na noite; Deus disse «Faça-se Newton» e tudo foi luz.”

Alexander Pope, 1727
(Epitáfio de Newton)

1810

Goethe publica o seu tratado acerca da cor

1905

Einstein mostra que a luz se pode comportar como partículas em algumas circunstâncias

electromagnéticas – ondas de campos eléctricos e magnéticos acoplados – e não a reverberação de partículas sólidas. Quando o comportamento da onda electromagnética da luz foi descoberto, a ideia de corpúsculos de Newton foi posta na prateleira. Foi, no entanto, ressuscitada sob uma forma diferente, quando Einstein mostrou que a luz também se comporta por vezes como um jacto de partículas que podem transportar energia, mesmo não tendo massa.

Os movimentos ondulatórios surgem de várias formas. Há dois tipos básicos de ondas: longitudinais e transversais. Ondas longitudinais, ou de compressão, ocorrem quando os pulsos que produzem a onda actuam ao longo da mesma direcção segundo a qual a onda se propaga, causando uma série de picos de alta e baixa pressão. As ondas sonoras, causadas por exemplo pela pele de um tambor a vibrar no ar, são longitudinais, tal como as ondulações das pernas de uma centopeia, quando ela se dobra ao meio e depois se desdobra, empurrando-se para a frente. As ondas de luz e de água, por outro lado, são ondas transversas em que a perturbação inicial actua na perpendicular à direcção de propagação da onda. Se bater na ponta de uma mola pendurada do tecto, vai-se gerar uma onda transversa que se vai propagar ao longo de toda a mola, mesmo que o movimento da mão seja perpendicular à mola. De forma análoga, uma cobra faz uma onda transversal enquanto rasteja, usando o movimento para um lado e para outro para conseguir andar para a frente. As ondas de água também são transversais, porque cada molécula de água flutua para cima e para baixo, sendo que é a onda em si que se propaga em direcção ao horizonte. Ao contrário das ondas de água, o movimento transversal das ondas

luminosas é devido a mudanças na intensidade dos campos eléctrico e magnético, alinhados perpendicularmente à direcção de propagação da onda.

A roda das cores

Newton dispôs as cores do arco-íris por ordem, do vermelho até ao azul, e pintou-as num disco circular, para mostrar as formas segundo as quais as cores se combinam. Colocando cores primárias – vermelho, amarelo e azul – em posições diferentes do disco, e combinando-as em proporções diferentes, ele conseguiu gerar todas as cores intermédias. Cores complementares, como por exemplo o azul e o laranja, foram colocadas em posições opostas. Muitos artistas interessaram-se pela teoria da cor de Newton, e sobretudo pela sua roda de cores, que os ajudava a representar tons em contraste e efeitos de iluminação. As cores complementares permitiam um contraste máximo, ou então eram úteis para se pintarem sombras.

Ao longo do espectro As diversas cores de luz reflectem os diversos comprimentos de onda destas ondas electromagnéticas. O comprimento de onda é a distância que se mede entre os picos consecutivos de uma onda. À medida que passa por um prisma, a luz branca divide-se em muitos tons, porque cada tom está associado a um comprimento de onda diferente, e devido a isso eles são desviados segundo

ângulos diferentes pelo vidro. O prisma dobra as ondas luminosas segundo um ângulo que depende do comprimento de onda da luz, sendo que a trajectória da luz vermelha é menos deflectida e a da luz azul é a mais desviada, o que produz a sequência de cores do arco-íris. O espectro de luz visível aparece segundo a ordem dos comprimentos de onda, desde o vermelho com o mais longo, passando pelo verde até ao azul, com o comprimento de onda mais curto.

E o que é que está em ambas as extremidades do arco-íris? A luz visível é só uma parte do espectro electromagnético. É muito importante para nós porque os nossos olhos desenvolveram-se ao longo do tempo usando esta parte sensitiva do espectro. Como os comprimentos de onda da luz visível estão mais ou menos à mesma escala que os átomos e as moléculas (décimos de milionésimos do metro), as interações entre a luz e os átomos num material qualquer são fortes. Os nossos átomos evoluíram para sermos capazes de usar a luz visível porque ela é muito sensível à estrutura atómica. Newton estava fascinado pelo funcionamento do olho; ele chegou a introduzir uma agulha de coser na parte de trás do seu próprio olho para ver como é que a pressão afectava a sua percepção da cor.

Para além da luz vermelha estão os infravermelhos, com comprimentos de onda de milionésimos do metro. Os raios infravermelhos transportam o calor do Sol, e são também recolhidos pelos óculos de visão nocturna que «vêem» o calor dos corpos. As microondas têm comprimentos de onda ainda maiores, de milímetros a centímetros, e as ondas de rádio chegam a comprimentos de onda de metros ou maiores ainda. Os fornos de microondas usam raios electromagnéticos de microondas para fazer rodar moléculas de água na comida, o que as faz aquecer. Na outra extremidade do espectro, para lá do azul, está a luz ultravioleta. É emitida pelo Sol e pode danificar a nossa pele, embora a maior parte desta radiação seja bloqueada pela camada de ozono da Terra. A comprimentos de onda ainda mais pequenos estão os raios X – usados em hospitais porque atravessam os tecidos do corpo humano – e, com os comprimentos de onda mais pequenos que se conhece, os raios gama.

Desenvolvimentos Embora Newton nos tenha elucidado acerca da física da luz, os filósofos e artistas continuaram interessados na nossa percepção das cores. No século XIX o polímata alemão Johann Wolfgang von Goethe investigou a forma como o olho e a mente humanos interpretam cores colocadas umas ao pé das outras. Goethe introduziu o magenta na roda das cores de Newton (ver caixa) e notou que as sombras assumem, com frequência, a cor oposta à do objecto iluminado, de forma que por trás de um objecto vermelho surge uma sombra azul. A roda de cores actualizada de Goethe é hoje em dia muito utilizada por artistas e designers.

a ideia resumida
Para lá do arco-íris

15 O princípio de Huygens

Se deixarem cair uma pedra num lago, ela produz uma onda circular que se expande. Porque é que se expande? E como é que se pode prever o seu comportamento se ela passar em torno de um obstáculo, como por exemplo o tronco de uma árvore, ou se se reflectir nas margens do lago? O princípio de Huygens é uma ferramenta para calcular a forma segundo a qual as ondas fluem, ao imaginar que cada ponto de uma frente de onda é uma nova fonte de ondas.

O físico holandês Christiaan Huygens inventou uma forma prática para prever a progressão de ondas. Vamos imaginar que vocês atiraram uma pedra a um lago, e que daí resultou uma série de ondas em anéis concêntricos. Se imaginarem «congelar» uma onda circular num dado momento, então pode-se pensar em cada ponto da onda como sendo uma nova fonte de ondas circulares cujas propriedades são idênticas às da onda congelada. É como se estivéssemos a deixar cair um anel de pedras na água, em simultâneo, seguindo o contorno da primeira onda. Este outro conjunto de perturbações alarga a onda ainda mais, o que nos dá novos pontos de partida para outro conjunto de fontes de dispersão da energia das ondas. Repetindo este princípio muitas vezes, conseguimos seguir a evolução da onda.

Passo a passo Chama-se princípio de Huygens à ideia de que cada ponto de uma frente de onda actua como uma nova fonte de energia ondulatória, com a mesma frequência e fase. A frequência de uma onda é o

Cronologia

1655 D.C.

Huygens descobre Titã

1678

O tratado de Huygens acerca da teoria ondulatória da luz é publicado

CHRISTIAAN HUYGENS 1629–95

Filho de um diplomata holandês, Christiaan Huygens foi um físico aristocrata que colaborou imenso com cientistas e filósofos por toda a Europa no século XVII, incluindo nomes famosos como Newton, Hooke e Descartes. As primeiras publicações de Huygens eram acerca de problemas matemáticos, mas ele também estudou Saturno. Era um cientista prático que registou a patente do primeiro relógio de pêndulo e tentou inventar um relógio náutico que se pudesse levar para o mar para

calcular a longitude. Huygens viajou pela Europa fora, sobretudo por Paris e Londres, encontrando-se e trabalhando com cientistas famosos no pêndulo, em movimentos circulares, em mecânica e em óptica. Embora tenha trabalhado em forças centrífugas com Newton, Huygens pensava que a teoria da gravidade de Newton, com o seu conceito de uma acção à distância, era um 'absurdo'. Em 1678, Huygens publicou o seu tratado acerca da teoria ondulatória da luz.

número de ciclos da onda que ocorrem num dado período de tempo, e a fase da onda identifica em que parte do ciclo é que vocês estão. Por exemplo, todos os picos de onda têm a mesma fase, e todos os mínimos de onda estão a meio ciclo de distância deles. Se pensarem numa onda no oceano, a distância entre dois picos de onda, a que se chama o seu comprimento de onda, é talvez de uns 100 metros. A sua frequência, que é também o número de comprimentos de onda que passam num dado ponto num segundo, poderá ser de um comprimento de onda de 100 metros em 60 segundos, ou seja, um ciclo por minuto. As ondas do mar mais rápidas são os *tsunami*, que chegam a atingir os 800 quilómetros por hora, a velocidade de um avião a jacto, que se reduz para dezenas de quilómetros por hora, aumentando quando chegam à costa e a inundam.

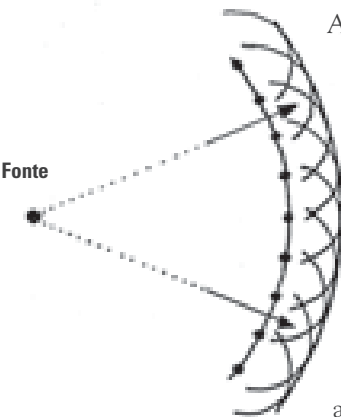
Para seguir o progresso de uma onda, o princípio de Huygens pode ser aplicado várias vezes consecutivas, à medida que a onda se depara com obstáculos e atravessa os percursos de outras ondas. Se desenharem a posição de uma frente de onda numa folha de papel, a sua posição subsequente poderá ser descrita usando compassos para desenhar círculos em muitos pontos ao longo da frente de onda, e desenhando uma linha contínua através das suas orlas exteriores, o que nos dará a próxima posição da onda.

1873

As equações de Maxwell mostram que a luz é uma onda electromagnética

2005

A sonda Huygens aterriza em Títã



A abordagem simples de Huygens descreve as ondas em muitas circunstâncias. Uma onda linear permanece linear à medida que se propaga, porque as ondas mais pequenas que produz ao longo da sua extensão somam-se todas e dão uma nova frente de onda linear, logo a seguir à primeira. No entanto, se vocês olharem para um conjunto de ondas do mar paralelas à medida que elas passam através de uma abertura pequena no paredão de um porto, verão que essas ondas distorcem-se, formando arcos, assim que passam pelo paredão. Só consegue passar um pedaço muito curto das ondas lineares, e os arcos formam-se nas bordas deste pedaço não-afectado onde, pelo princípio de Huygens, nascem novas ondas circulares. Se a abertura no paredão for pequena, comparada com a distância entre as ondas, então o padrão é dominado pelas bordas arredondadas e a onda transmitida pode quase parecer semi-circular. A esta dispersão da energia das ondas nos dois lados da abertura chama-se difracção.

Huygens em Titã

A sonda espacial Huygens aterrou na superfície de Titã em 14 de Janeiro de 2005, após uma viagem de sete anos. Contida no interior de uma camada exterior protectora de alguns metros de diâmetro, a sonda Huygens levou a cabo uma série de experiências que mediram os ventos, a pressão atmosférica, a temperatura e a composição da superfície à medida que descia através da atmosfera até aterrar numa planície gelada. Titã é um mundo esquisito, cuja atmosfera e superfície estão banhadas por metano líquido. É, de certa forma, um lugar que poderia albergar formas de vida primitivas, como bactérias que comessem metano. A Huygens foi a primeira sonda espacial a aterrar num corpo celeste no sistema solar exterior.

Acreditam nos vossos ouvidos?

O princípio de Huygens também explica porque é que, quando vocês gritam por alguém na sala ao lado, eles ouvem a vossa voz como se vocês estivessem na porta, e não algures na sala adjacente. De acordo com Huygens, quando as ondas chegam à porta, tal como sucede na abertura no paredão do porto, cria-se ali um novo conjunto de fontes da energia da onda.

De forma que tudo aquilo de que a pessoa que está à escuta se apercebe é que estas ondas foram geradas na porta, tendo-se perdido toda a história anterior das ondas no quarto ao lado.

Da mesma forma, se vocês olharem para uma onda circular quando ela atinge a borda de um lago, verão que ela se reflecte e produz círculos invertidos.

O primeiro ponto da onda a ter chegado à borda actuou como uma nova fonte, e deu início à propagação, para trás, de uma nova onda circular. Assim, as reflexões das ondas também podem ser descritas usando o princípio de Huygens.

Se as ondas oceânicas se começam a deslocar em águas menos profundas, como por exemplo próximo de uma praia, a sua velocidade muda e as frentes de onda dobram-se para dentro, em direcção ao fundo. Huygens descreveu esta «refracção» alterando os raios das ondas secundárias, de forma que ondas mais lentas produziam ondas secundárias mais pequenas. As ondas secundárias mais lentas não se deslocam tão depressa quanto as mais rápidas, de forma que a nova frente de onda faz um ângulo com a original.

Uma previsão irrealista do princípio de Huygens é que, se todas estas novas ondas secundárias são fontes de energia ondulatória, elas também deveriam gerar uma onda que se deslocasse para trás, e não só uma que se desloca para a frente. Então porque é que uma onda só se propaga para a frente? Huygens não tinha resposta a esta pergunta, e limitou-se a assumir que a energia das ondas só se propaga para a frente, e que o movimento para trás é ignorado. Assim, o princípio de Huygens é, na verdade, apenas uma ferramenta útil para prever a evolução das ondas.

Os anéis de Saturno Para além de se preocupar com ondas, Huygens também descobriu os anéis de Saturno. Ele foi o primeiro a ter demonstrado que o planeta está envolvido por um disco achatado, em vez de rodeado por luas enormes, ou ter um «inchaço» equatorial variável, como se pensava. Ele deduziu que a mesma física que explicava as órbitas das luas, a gravidade de Newton, se iria aplicar a muitos corpos pequenos, que orbitariam formando um anel. Em 1655, Huygens também descobriu a maior das luas de Saturno, Titã. Exactamente 350 anos mais tarde, uma sonda chamada Cassini chegou a Saturno, carregando consigo uma cápsula pequena, baptizada em honra de Huygens, que desceu através das nuvens da atmosfera de Titã até aterrar na sua superfície de metano congelado. Titã tem continentes, dunas de areia, lagos e talvez até rios, todos feitos de metano e etano sólidos e líquidos, e não de água. Huygens teria ficado maravilhado ao pensar que um dia uma nave com o seu nome iria viajar até àquele mundo distante, mas o princípio baptizado em sua honra ainda pode ser utilizado para explicar as ondas alienígenas que lá se descobriram.

“Cada vez que um homem se ergue por um ideal... ele envia uma pequena onda de esperança, e cruzando-se umas com as outras, de um milhão de centros de energia e ousadia diferentes, essas ondas fazem uma corrente que pode demolir os mais poderosos muros de opressão e de resistência.”

Robert Kennedy, 1966

a ideia resumida
Progressão de ondas

16 A lei de Snell

Porque é que uma palhinha num copo de água parece estar dobrada? Porque a luz move-se a velocidades diferentes no ar e na água, o que faz com que os seus raios se dobrem. A lei de Snell, que descreve este dobrar dos raios da luz, explica porque é que aparecem miragens de poças de água em estradas quentes, e porque é que as pessoas parecem ter pernas curtas nas piscinas. Hoje em dia está a ser aplicada para ajudar a criar materiais inteligentes que pareçam ser invisíveis.

Já alguma vez se riram dos vossos amigos, ao verem-nos numa piscina de água límpida, porque eles parecem ter pernas mais curtas na água do que têm em terra? Já pensaram porque é que uma palhinha parece estar dobrada quando está mergulhada no vosso copo? A lei de Snell dá a resposta.

Quando a luz atravessa uma fronteira entre dois materiais, nos quais se move a velocidades diferentes, digamos entre o ar e a água, os raios desviam-se. Chama-se a isto refração. A lei de Snell descreve quanto desvio ocorre nas transições entre materiais diferentes, e tem esse nome devido ao matemático holandês do século XVII Willebrord Snellius, embora ele não tenha nunca chegado a publicar o seu trabalho. Por vezes chamamos-lhe lei de Snell-Descartes, porque René Descartes publicou uma demonstração em 1637. Este comportamento da luz era bem conhecido, tendo surgido em trabalhos escritos desde meados do século X, embora tenha demorado séculos até ter tido um tratamento formal.

A luz move-se mais devagar em materiais mais densos, como por exemplo a água ou o vidro, em comparação com o ar. De forma que um raio de luz do

Cronologia

984 D.C.

Ibn Sahl escreve acerca de refração e lentes

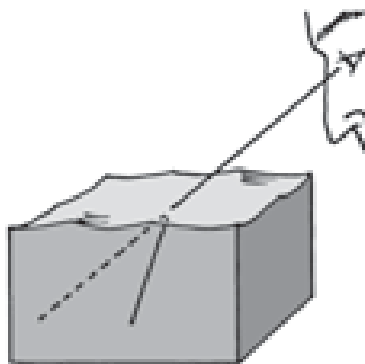
1621

Snellius concebe a sua lei da refração

1637

Descartes publica uma lei similar

sol deslocando-se em direcção a uma piscina desvia-se em direcção ao fundo da piscina quando chega à superfície da água. Como os raios refractados chegam aos nossos olhos com um ângulo mais pequeno, com um desvio inverso, assumimos que nos chegam directamente e, por isso, as pernas de uma pessoa que esteja na piscina parecem ter sido comprimidas. As miragens de poças de água em estradas quentes formam-se de maneira parecida. A luz vinda do céu dobra-se ao passar por cima da superfície da estrada, porque muda de velocidade na camada de ar quente que está mesmo por cima do asfalto torrado pelo sol, de tal forma que a luz desvia-se da vertical e nós acabamos por ver o reflexo do sol na estrada, o que nos parece ser uma poça de água.



O ângulo segundo o qual um raio se desvia está relacionado com as velocidades relativas às quais ele se move nos dois materiais – tecnicamente, o rácio das velocidades dá o rácio dos senos dos ângulos incidentes (medidos relativamente à vertical). De forma que, para um raio de luz que está a ir do ar para a água, ou para qualquer outra substância mais densa, o raio dobra-se para dentro e o seu percurso torna-se mais inclinado.

Índice de refração A luz move-se a uns estonteantes 300 milhões de metros por segundo no vácuo (ou seja, o espaço vazio). O rácio da sua velocidade num meio material mais denso, como vidro, para a velocidade no vácuo chama-se índice de refração do material. Um vácuo tem, por definição, um índice de refração igual a 1; um material com um índice de refração igual a 2 iria reduzir a velocidade da luz para metade do seu valor no espaço. Um índice de refração elevado significa que a luz é muito desviada à medida que passa pela substância.

O índice de refração é uma característica do material em si. Já conseguimos construir materiais

Doces visões

O índice de refração é uma ferramenta útil na produção de vinho e de sumos de fruta. Os produtores de vinho usam um refractómetro para medir a concentração de açúcar no sumo de uva antes de ele ser transformado em vinho. Açúcar dissolvido aumenta o índice de refração do sumo e também indica quanto álcool ele virá a conter.

1703

Huygens publica a lei de Snell

1990

Desenvolvimento de meta-materiais

Pulos para a água

As piscinas são um dos temas favoritos do artista britânico David Hockney. Além de gostar de pintar os efeitos ópticos de corpos a deslizar debaixo de água, banhados também pela luz do sol brilhante da sua casa na Califórnia, Hockney causou um grande burburinho no mundo das artes ao sugerir que alguns artistas famosos usaram lentes para criarem os seus trabalhos – possivelmente desde o século xv. Dispositivos ópticos simples poderiam projectar uma cena numa tela, sobre a qual o artista desenharia traços sobre os contornos e pintaria cores. Hockney descobriu geometrias bastante sugestivas ao observar velhos mestres, como Ingres e Caravaggio.

que possuem índices de refração específicos, e que podem ser muito úteis (por exemplo, para fazer lentes para óculos que corrijam problemas na visão de uma pessoa). O poder de uma lente ou de um prisma depende dos seus índices de refração; lentes com grande ampliação têm índices de refração elevados.

A refração ocorre em muitas ondas, não só na luz. As ondas do mar perdem velocidade à medida que a profundidade da água diminui, o que é análogo a uma mudança no índice de refração. Por causa disto, as ondas de água que estão a dirigir-se para uma praia seguindo uma direcção que faz um dado ângulo relativamente à costa desviam-se para a praia à medida que se aproximam, e é por isso que a rebentação fica sempre paralela à praia.

Reflexão interna total

Por vezes, se um raio de luz a mover-se dentro de vidro vai de encontro à fronteira com o ar a um ângulo que é demasiado grave, o raio irá reflectir-se para dentro do vidro, em vez de continuar para o ar. A isto chama-se reflexão interna total, porque toda a luz continua dentro do vidro. O ângulo crítico para o qual isto sucede é também determinado pelos índices de refração relativos dos dois materiais. Este fenómeno só acontece para ondas a viajarem de um material com um índice de refração elevado para outro com índice de refração baixo, como por exemplo do vidro para o ar.

O princípio do tempo mínimo de Fermat A lei de Snell é uma consequência do princípio do tempo mínimo de Fermat, que declara que os raios luminosos tomam o percurso mais rápido através de qualquer substância. Logo, ao ter de abrir caminho entre uma mistura de materiais com vários índices de refração, o raio luminoso vai sempre escolher o percurso mais rápido, dando preferência aos materiais de baixo índice de refração. Isto é essencialmente uma forma de definir o que é um raio luminoso, e pode ser derivado do princípio de Huygens, observando que os raios que viajam através do percurso mais rápido irão tender a reforçarem-se mutuamente e a criar um feixe, enquanto que a luz que percorre direcções aleatórias irá, em média, cancelar-se. O matemático Pierre Fermat propôs este princípio no século xvii, altura em que o estudo da óptica estava no seu auge.

PIERRE FERMAT 1601–65

Um dos maiores matemáticos do seu tempo, Pierre Fermat era um advogado em Toulouse que se dedicava à matemática no seu tempo livre. Após se ter correspondido com matemáticos famosos em Paris, a reputação de Fermat subiu. Entrou em conflito com René Descartes acerca da sua teoria da refacção rival, descrevendo-a como «andar aos apalhões às escuras». Descartes ficou zangado, mas era Fermat quem tinha razão. Mais tarde, Fermat condensou o seu trabalho no princípio de tempo mínimo de Fermat, o conceito de a luz seguir sempre o percurso mais curto. O seu trabalho foi interrompido pela guerra civil em França e pela peste.

Apesar de rumores falsos em como também ele teria sucumbido à peste, continuou a trabalhar em teoria de números. Fermat é sobretudo lembrado pelo último teorema de Fermat, que afirma que a soma dos cubos de dois números não pode ser também um cubo (e por aí fora para potências superiores). Escreveu na margem de um livro «descobri uma demonstração realmente notável [deste teorema] que esta margem é demasiado pequena para conter». A demonstração perdida de Fermat intrigou matemáticos durante três séculos, até que o matemático britânico Andrew Wiles finalmente foi capaz de provar o teorema em 1994.

Meta-materiais Os físicos estão actualmente a conceber os chamados meta-materiais, que se comportam de uma forma nova quando são iluminados por luz, ou por outras ondas electromagnéticas. Os meta-materiais são construídos de forma a que o seu comportamento relativamente à luz seja ditado pela sua estrutura física e não pela sua composição química. Uma opala é um meta-material natural – a sua estrutura cristalina afecta a forma como a luz se reflecte e refracta na sua superfície, o que produz brilhos de diversas cores. No final dos anos 1990 foram construídos meta-materiais com índices de refacção negativos, em que a luz é dobrada no sentido contrário na interface entre dois materiais. Se um vosso amigo estivesse numa piscina cheia de um líquido com um índice de refacção negativo, em vez de verem a parte da frente das pernas dele, que pareceriam mais curtas, veriam a parte de trás, «colada» ao resto do corpo, aparecer à vossa frente. Materiais com índices de refacção negativos podem ser utilizados para fazer «super-lentes» que formam imagens muito mais nítidas do que é possível obter com o melhor dos vidros. E em 2006 os físicos conseguiram fabricar um meta-material de camuflagem que aparenta ser invisível para as microondas.

a ideia resumida
A luz descobre
o caminho mais curto

17 A lei de Bragg

A estrutura em dupla hélice do DNA foi descoberta usando a lei de Bragg. Ela explica como é que as ondas que se deslocam através de um sólido com uma estrutura ordenada se reforçam entre si e produzem um padrão de manchas brilhantes, cujo espaçamento depende das distâncias regulares entre os átomos ou as moléculas do sólido. Ao medir o padrão de manchas que emerge, consegue-se deduzir a arquitectura do material cristalino.

Se estiverem sentados numa sala iluminada, ponham a vossa mão próxima da parede e verão por trás dela uma silhueta bem definida. Afastem a vossa mão da parede e o contorno da sombra irá ficar borrado, difuso. Isto deve-se a luz que se está a difractar em torno da vossa mão. Os raios de luz difundem-se para dentro em torno dos vossos dedos, o que esborrata o contorno da mão. Todas as ondas se comportam desta maneira. As ondas de água difractam-se em torno das bordas dos paredões dos portos e as ondas sonoras curvam-se em torno das arestas dos palcos de espectáculos.

A difracção pode ser descrita usando o princípio de Huygens, que prevê a passagem de uma onda considerando cada ponto de uma frente de onda como sendo uma fonte pontual de mais energia da onda. Cada ponto produz uma onda circular, e essas ondas somam-se todas umas com as outras para descrever a forma como a onda global progride para a frente. É isto que sucede quando uma série de ondas paralelas passam em torno de um obstáculo, como por exemplo a vossa mão, ou através de uma fenda, como a abertura no paredão do porto ou uma porta.

Cronologia

1895 D.C.

Röntgen descobre os raios X

1912

Bragg descobre a sua lei da difracção

WILLIAM LAWRENCE BRAGG 1890–1971

William Lawrence Bragg nasceu em Adelaide, onde o seu pai William Henry era professor de matemática e de física. Bragg júnior tornou-se no primeiro australiano a fazer um raio X quando caiu da sua bicicleta e partiu o braço. Estudou ciências físicas e após ter-se licenciado seguiu o seu pai para a Inglaterra. Em Cambridge, Bragg descobriu a sua lei da difracção de raios X por cristais. Discutiu a suas ideias com o pai, mas ficou irritado por muitas pessoas pensarem que tinha sido o pai a fazer a descoberta em vez dele. Durante a Primeira e Segunda Guerras Mundiais, Bragg alistou-se no exército e trabalhou em sonares. Depois, Bragg regressou a Cambridge onde estabeleceu diversos pequenos grupos de pesquisa. Na última parte da sua carreira, Bragg tornou-se um divulgador de ciência bastante popular, organizando aulas para crianças em idade escolar na Royal Institution em Londres, e aparecendo frequentemente na televisão.

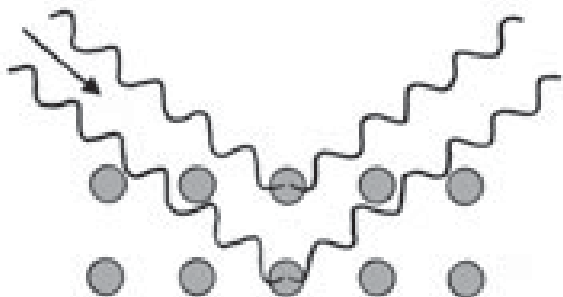
Cristalografia de raios X O físico australiano William Lawrence Bragg descobriu que a difracção até acontece para ondas a atravessarem cristais. Um cristal é feito de muito átomos dispostos numa estrutura organizada em rede, com linhas e colunas regulares. Quando Bragg projectou raios X através de um cristal e sobre um ecrã, os raios dispersaram-se nas linhas e colunas. Os raios emergentes do cristal acumulavam-se mais em certas direcções do que noutras, até gradualmente se construir um padrão de manchas. Dependendo do tipo de cristal utilizado, apareciam padrões de manchas diferentes.

Para se conseguir observar este efeito era necessário usar raios X, descobertos pelo físico alemão Wilhelm Röntgen em 1895, porque o seu comprimento de onda é muito pequeno, mil vezes menor do que o comprimento de onda da luz visível, e menor do que o espaçamento entre átomos no cristal. Ou seja, os comprimentos de onda dos raios X são pequenos o suficiente para eles atravessarem as camadas de cristal, e serem fortemente difractados por elas.

As manchas mais brilhantes de raios X são geradas quando os raios seguem caminhos através do cristal tais que os seus sinais ficam «em fase» uns com os outros. As ondas que estão «em fase», ou seja, em que os seus picos e mínimos estão alinhados, conseguem adicionar-se entre si e reforçar o seu brilho, produzindo manchas. Quando estão «em oposição de fase», com os picos e mínimos desalinhados, cancelam-se mutuamente e não emerge luz nenhuma. Vê-se

1953

A cristalografia de raios X é utilizada para descobrir a estrutura do DNA



assim um padrão de pontos brilhantes, cujo espaçamento diz-nos quais as distâncias entre os átomos no cristal. Este efeito de reforço e cancelamento entre ondas chama-se «interferência».

Bragg descreveu tudo isto matematicamente considerando duas ondas, uma a reflectir-se na superfície do cristal e outra tendo penetrado só uma camada de átomos dentro

do cristal. Para a segunda onda estar em fase e reforçar a primeira onda, ela tem de viajar uma distância superior, e essa distância tem de ser um número inteiro de comprimentos de onda maior do que a da primeira onda. Esta distância extra depende do ângulo segundo o qual os raios incidem no cristal, e da separação entre as camadas de átomos. A lei de Bragg afirma que a interferência que se observa e os espaçamentos do cristal estão relacionados para um dado comprimento de onda.

Estrutura profunda A cristalografia de raios X é muitíssimo utilizada por físicos para determinar a estrutura de novos materiais, e por químicos e biólogos ao investigarem arquitecturas moleculares. Em 1953, foi usada para identificar a estrutura em dupla hélice do DNA; reza a lenda que Francis Crick e Jim Watson tiveram a sua ideia ao olharem para os padrões de interferência de raios X que Rosalind Franklin tinha obtido para o DNA, e dando-se

A dupla hélice do DNA

Nos anos 1950, vários investigadores estavam a debater-se com a estrutura do DNA, um dos blocos básicos de construção da vida. Os físicos britânicos James Watson e Francis Crick publicaram sua ideia de uma estrutura em dupla hélice em 1953, o que foi um desenvolvimento crucial. Eles reconheceram ter sido inspirados pelos investigadores do King's College de Londres, Maurice Wilkins e Rosalind Franklin, que tinham feito fotografias de cristalografia de raios X do DNA, usando a lei de Bragg. Franklin fez fotografias notavelmente nítidas que mostravam uma rede de interferências de pontos brilhantes que acabou por revelar a estrutura do DNA. Crick, Watson e Wilkins ganharam o Prémio Nobel devido aos seus trabalhos, mas Franklin não o recebeu, por ter morrido jovem. Algumas pessoas também acreditam que o seu papel na descoberta foi minimizado, talvez devido às atitudes sexistas da altura. É possível que os resultados de Franklin também tenham sido passados a Watson e Franklin sem que ela soubesse. Desde então, a sua contribuição foi reconhecida.

WILHELM RÖNTGEN 1845–1923

Wilhelm Röntgen nasceu na Alemanha, no Baixo Reno, mudando-se, ainda em criança, para a Holanda. Estudou física em Utrecht e Zurique, e trabalhou em muitas universidades antes de períodos mais longos como professor nas universidades de Würzburg e depois Munique. O trabalho de Röntgen centrava-se no calor e no electromagnetismo, mas ele é mais famoso por ter descoberto os raios X, em 1895. Ao passar electricidade através de um gás a baixa pressão, ele viu que um ecrã com uma

cobertura química especial fluorescia, mesmo quando a experiência era levada a cabo em escuridão completa. Estes novos raios passavam através de muitos materiais, incluindo a carne da mão da sua mulher, colocada em frente a uma placa fotográfica. Ele deu o nome de raios X a estes raios, porque a sua origem era desconhecida. Mais tarde, foi mostrado que eles são ondas electromagnéticas como a luz, a não ser pelo facto de terem frequência muito mais elevada.

conta de que as moléculas que os tinham produzido tinham de estar dispostas como uma hélice dupla.

Pela primeira vez, a descoberta dos raios X e das técnicas de cristalografia dava aos físicos ferramentas para olharem para a estrutura profunda da matéria, e até para dentro do corpo. Muitas das técnicas que se usam hoje em dia dependem do mesmo tipo de física. A tomografia computadorizada junta muitas fatias de raios X do corpo até formar uma imagem interna realista; os ultra-sons mapeiam os órgãos do corpo usando os seus ecos de altas-frequências; a imagiologia por ressonância magnética (na sigla inglesa, MRI) sonda a água dispersa pelos tecidos do corpo, identificando vibrações moleculares estabelecidas usando ímanes potentíssimos; e a tomografia por emissão de positrões (na sigla inglesa, PET) segue traços de radioactividade à medida que eles fluem através do corpo. Portanto, quer os médicos quer os pacientes estão gratos a físicos como Bragg por terem desenvolvido estas técnicas.

A lei de Bragg escreve-se matematicamente da seguinte maneira:

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

onde d é a distância entre as camadas de átomos, θ é o ângulo de incidência da luz, n é um número inteiro e λ é o comprimento de onda da luz.

a ideia resumida

Descobrendo estruturas

18 A difracção de Fraunhofer

Porque é que nunca se é capaz de obter uma imagem perfeita numa câmara fotográfica? Porque é que a nossa vista é, ela própria, imperfeita? Mesmo o mais pequeno dos pontos fica esborratado porque a luz é distorcida ao passar pelo olho ou pela abertura da câmara. A difracção de Fraunhofer descreve este esborratar para os raios de luz que chegam até nós de uma paisagem distante.

Quando vocês olham para um barco que está bem longe, no horizonte, é impossível ler o nome da embarcação. Poderiam usar binóculos para isso, ampliando a imagem, mas porque é que os nossos olhos têm uma resolução tão limitada? A razão está no tamanho das pupilas dos nossos olhos (as suas aberturas). Elas têm de estar bem abertas para deixarem passar luz suficiente para os sensores dos olhos começarem a funcionar, mas quanto mais abertas estão mais as ondas de luz que entram ficam borradas.

As ondas de luz que atravessam as lentes e entram nos olhos podem vir de muitas direcções. Quanto maior for a abertura, mais serão as direcções segundo as quais os raios poderão entrar. Tal como na difracção de Bragg, os diferentes percursos da luz irão interferir, dependendo de as suas fases estarem alinhadas ou desalinhadas. A maior parte dos percursos passa em fase, formando assim um ponto central claro e brilhante. Mas a largura desse ponto é interrompida no ponto em que raios adjacentes se cancelam entre si, e aparece uma série de bandas escuras e claras alternadas nas bordas. É a largura deste ponto central que dita os detalhes mais precisos que os nossos olhos conseguem captar.

Cronologia

1801 D.C.

Thomas Young leva a cabo a sua experiência das duas fendas

1814

Fraunhofer inventa o espectroscópio

Campo longínquo A difracção de Fraunhofer, assim baptizada em honra ao grande fabricante de lentes alemão Joseph von Fraunhofer, descreve o esborrar das imagens que se observa quando os raios luminosos que incidem numa abertura ou numa lente lá chegam paralelos uns aos outros. A difracção de Fraunhofer, também chamada de difracção do campo longínquo, sucede quando passamos a luz de uma fonte distante (por exemplo, o Sol ou as estrelas) através de uma lente. Esta lente poderia estar nos nossos olhos ou numa câmara ou telescópio. Tal como acontece nas limitações da nossa vista, em toda a fotografia os efeitos de difracção borram a imagem final. Como consequência, existe um limite natural para o quão nítida uma imagem pode ficar, uma vez que tenha passado através de um qualquer sistema óptico – o «limite de difracção». Este limite aumenta com o comprimento de onda da luz e o inverso do tamanho da abertura ou lente. Isto faz com que imagens azuis apareçam ligeiramente mais nítidas do que as vermelhas, e imagens tiradas com uma abertura ou lente maiores fiquem menos borradas.

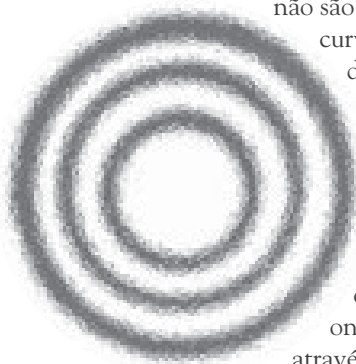
Difracção Da mesma maneira que as bordas da sombra da vossa mão ficam difusas devido à difracção da luz em torno da mão, a luz dispersa-se quando passa através de um buraco ou abertura estreitos. Um pouco contra a nossa intuição, quanto mais estreita for a abertura mais a luz se espalhará. Ao ser projectada num ecrã, a luz que emerge da abertura produz um pico central brilhante, flanqueado por bandas escuras e brilhantes alternadas, a que se chamam bandas de interferência, com um brilho que decai assim que nos afastamos do centro. A maior parte dos raios passa em linha recta e reforça-se mutuamente, mas os que saem desviados de um dado ângulo interferem entre si e produzem bandas claras ou escuras.

Quanto mais pequeno for o buraco maior será a separação entre as bandas, porque os percursos dos raios estão muito mais limitados e são parecidos entre si. Se vocês pegarem em dois tecidos muito finos, como dois lenços de seda, os segurarem de frente à luz e os mexerem um relativamente ao outro, irão ver bandas claras e escuras análogas a emergirem dos tecidos sobrepostos. Quando os põem um em cima do outro e rodam-nos, os vossos olhos irão captar uma série de áreas escuras e claras a moverem-se ao longo do material. Estes padrões de interferência das redes sobrepostas são também conhecidos como «padrões de moiré».

Quando a abertura ou lente é circular, como é o caso nas nossas pupilas e frequentemente nos dispositivos ópticos de câmaras fotográficas, o ponto central e as bandas circundantes formam

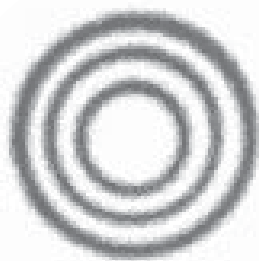
uma série de circunferências concêntricas a que se chamam anéis de Airy (ou discos de Airy), devido ao físico escocês do século XIX George Airy.

Campo próximo A difracção de Fraunhofer é observada em muitas ocasiões, mas se a fonte de luz estiver próxima do plano da abertura, por vezes emerge um padrão ligeiramente diferente. Os raios de luz incidentes não são paralelos entre si e as frentes de onda que chegam à abertura são curvas, não planas. Neste caso, resulta um padrão de difracção diferente, em que as bandas já não estão espaçadas de forma regular. A série de frentes de onda incidentes assume a forma de superfícies encurvadas concêntricas, um pouco como cascas de cebola, todas elas com um comprimento de onda de espessura e tendo a fonte luminosa no seu centro. Quando estas frentes de onda curvas chegam ao plano da abertura, ela corta-as como uma faca corta as camadas de uma cebola passando fora do centro. Na abertura isto aparece como um conjunto de anéis, onde cada anel representa uma zona em que as ondas que passaram através dela estão separadas de um comprimento de onda.



Difracção de Fraunhofer

Para compreender como é que estes raios encurvados se misturam entre si, é preciso somar todos os raios dos anéis na abertura. Eles aparecem num ecrã plano como uma série de bandas escuras e claras, como sucede para os raios paralelos, a não ser pelo facto dos seus espaçamentos já não serem regulares, tornando-se em vez disso cada vez mais estreitos à medida que vocês se afastam do centro. A isto chamamos difracção de Fresnel, em honra a August Fresnel, o cientista francês do século XIX que a descobriu.



Difracção de Fresnel

Fresnel também se deu conta que, alterando a abertura, era possível alterar quais fases passavam e, portanto, qual o padrão que daí resultava. Ele usou esta descoberta para construir um novo tipo de lente que só permitia que passassem ondas em fase. Uma forma de fazer isto seria cortar uma série de anéis que estivessem exactamente nas posições de, digamos, todos os mínimos negativos das ondas assim que passassem pela abertura, de maneira que só os picos positivos conseguissem passar, praticamente sem interferências. Ou então poder-se-ia alterar a posição dos mínimos de meio comprimento de onda e depois transmiti-los, de forma que ficassem mais uma vez em fase com as ondas não bloqueadas. Inserindo anéis de vidro grosso nas posições

As duas fendas de Young

Na sua famosa experiência de 1801, Thomas Young parecia ter provado de forma conclusiva que a luz era uma onda. Ao difractor luz através de duas fendas, ele não só viu uma sobreposição de dois perfis de difracção mas também tiras extra, devidas à interferência dos raios de luz que tinham passado através de uma das fendas ou da outra. Os raios tornavam a interferir e produziam bandas claras e escuras, mas com uma separação que correspondia ao inverso da distância entre as fendas. Emergia assim um padrão de bandas finas sobreposto às bandas grossas provenientes da difracção em cada fenda individual. Quanto mais fendas paralelas se inserissem, mais nítido ficava este segundo padrão de interferência.

correctas é possível diminuir a velocidade da luz de uma dada fase, de tal forma que se obtém exactamente o necessário para alterar os comprimentos de onda.

O próprio Fresnel construiu lentes utilizando estas ideias para faróis, instalando a primeira em França em 1822. Imaginem aumentar as lentes de um par de óculos para o tamanho de que vocês precisariam num farol de 4,5 metros. A alternativa de Fresnel era uma série de anéis de vidro grandes mas muito finos, cada um dos quais tendo uma fracção do peso de uma única lente convexa. As lentes de Fresnel são utilizadas para focalizar os faróis de carros e por vezes também são colocadas nas janelas traseiras dos carros, sob a forma de painéis de plástico gravados transparentes, para ajudar à marcha-atrás.

Redes Fraunhofer expandiu o seu estudo da interferência ao construir a primeira rede de difracção. Uma rede de difracção tem uma série de aberturas, como se fossem linhas de fendas paralelas. Fraunhofer fez a sua com fios alinhados. Estas redes não se limitam a espalhar a luz – por terem fendas múltiplas, acrescentam mais características de interferência à luz transmitida.

Como a luz é difractada e interfere, ela comporta-se como se fosse uma onda. No entanto, isto nem sempre é assim. Einstein e outros mostraram que por vezes, se olharem da forma correcta, a luz se comporta não como uma onda mas sim como uma partícula. A mecânica quântica emergiu desta observação. O que é surpreendente, e que iremos ver mais tarde, é que nas versões quânticas da experiência das duas fendas a luz sabe se se deve comportar como uma onda ou como uma partícula e muda de carácter apenas porque a estamos a observar.

a ideia resumida

Ondas de luz em interferência

19 O efeito de Doppler

Já todos ouvimos a mudança de tom da sirene de uma ambulância quando passa por nós. As ondas que vêm de uma fonte que se está a mover em vossa direcção chegam apertadas umas contra as outras e devido a isso parecem ter uma frequência mais alta. Da mesma maneira, as ondas espalham-se e demoram mais tempo a chegar até vocês se a fonte se estiver a afastar, o que resulta numa diminuição da frequência. É isto o efeito de Doppler. Tem sido usado para medir a velocidade de carros, o fluxo do sangue e os movimentos de estrelas e galáxias pelo universo fora.



Quando uma ambulância passa disparada por vocês na rua, o som da sirene muda de tom, do agudo quando se está a aproximar para o grave quando se está a afastar. Esta mudança de tom é o efeito de

Doppler, proposto pelo matemático e astrónomo austríaco Christian Doppler em 1842. Ele surge devido ao movimento do veículo que está a emitir a onda relativamente a vocês, os observadores. Quando o veículo se aproxima, as suas ondas sonoras acumulam-se, as diversas frentes de onda são apertadas umas contra as outras e a distância entre elas diminui, de forma que o som fica mais agudo. Quando se afasta, cada nova frente de onda demora um pouco mais a chegar até vocês do que a anterior, os

Cronologia

1842 D.C.

Doppler apresenta o seu artigo acerca da mudança de cores na luz das estrelas

CHRISTIAN DOPPLER 1803–53

Christian Doppler nasceu numa família de pedreiros em Salzburgo, na Áustria. Ele era demasiado frágil para continuar o negócio da família e, em vez disso, foi para a universidade em Viena, para estudar matemática, filosofia e astronomia. Antes de ter encontrado uma colocação na Universidade de Praga, Doppler teve de trabalhar como guarda-livros, tendo até considerado emigrar para a América. Embora promovido a professor, Doppler debateu-se com a sua carga horária, e a sua saúde ressentiu-se. Um dos seus amigos escreveu: «É difícil acreditar quão frutuoso é o génio que a Áustria tem neste homem. Escrevi a... muitas pessoas que podem salvar Doppler para a ciência e não o deixarem morrer de esforço, como uma besta de carga. Infelizmente temo o pior.» Doppler acabou por deixar Praga e mudar-se de volta para Viena. Em 1842 apresentou um artigo que descrevia a mudança de cor na luz das estrelas, a que nós hoje chamamos efeito Doppler:

«Deve quase ser aceite com certeza que isto irá no futuro não muito distante oferecer aos astrónomos um muito bem-vindo meio de determinar os movimentos e distâncias daquelas estrelas que, devido às suas imensuráveis distâncias a nós e à consequente pequenez de ângulos paraláticos, até este momento quase não permitiam nenhuma esperança de tais medições e determinações.»

Embora encarado como imaginativo, teve uma recepção mista da parte de outros cientistas eminentes. Os detractores de Doppler questionaram as suas capacidades matemáticas, enquanto os seus amigos tinham em grande conta a sua criatividade científica e intuição.

intervalos entre elas tornam-se maiores e o tom cai, tornando-se grave. As ondas sonoras são pulsos de ar comprimido.

Para a frente e para trás Imaginem que uma pessoa numa plataforma em movimento, ou numa carruagem de um comboio, está a atirar-vos bolas continuamente, à frequência de uma bola a cada três segundos, contando o tempo no seu relógio de pulso. Se eles estiverem a mover-se em vossa direcção, as bolas vão sempre demorar um pouco menos de três segundos a chegar, porque de cada vez elas são lançadas um pouco mais próximo de vocês. E, portanto, o ritmo de lançamentos vai parecer ser mais rápido para quem está a apanhar as bolas. Da mesma

1912

Vesto Slipher mede os desvios para o vermelho de galáxias

1992

A primeira detecção de um planeta extra-solar usando o método de Doppler

‘Talvez quando pessoas longinhas noutros planetas captarem algum comprimento de onda nosso tudo aquilo que ouvirão seja um grito contínuo.’

Iris Murdoch, 1919–99

muitas aplicações. É utilizado em medicina, para medir o fluxo sanguíneo, e nos radares nas estradas para apanhar condutores em excesso de velocidade.

maneira, quando a plataforma se afasta, as bolas vão demorar um pouco mais a chegarem, porque têm de atravessar uma distância um pouco maior em cada lançamento, e por isso a frequência da sua chegada é mais baixa. Se conseguissem medir essa mudança de frequência com o vosso relógio, seriam capazes de calcular a velocidade do comboio onde vai o atirador de bolas. O efeito de Doppler aplica-se a quaisquer objectos que se estão a mover uns relativamente aos outros. Aconteceria o mesmo se fossem vocês que se estivessem a mover e o atirador de bolas estivesse parado no cais. Como forma de medir velocidades, o efeito Doppler tem

Planetas extra-solares

Foram descobertos mais de 200 planetas em órbita de estrelas que não são o nosso Sol. A maior parte são gigantes gasosos parecidos com Júpiter, mas em órbitas muito mais próximas das suas estrelas centrais. No entanto, alguns planetas possivelmente rochosos, semelhantes à Terra nos seus tamanhos, já foram localizados. Cerca de uma estrela em cada dez possui planetas, e isto tem alimentado a especulação de que alguns deles possam até permitir formas de vida. A grande maioria dos planetas foi descoberta observando a atracção gravitacional do planeta sobre a sua estrela hospedeira. Os planetas são minúsculos quando comparados com as estrelas em torno das quais orbitam, de forma que é difícil observá-los devido ao imenso brilho das estrelas. Mas a massa de um planeta «mexe» muito ligeiramente a estrela de um lado para o outro, e este balanço pode ser observado como um desvio de Doppler na frequência de uma propriedade característica do espectro da estrela.

Os primeiros planetas extra-solares foram detectados em torno de um pulsar em 1992 e em torno de uma estrela normal em 1995. Este tipo de detecção é hoje em dia rotineira, mas os astrónomos continuam a procurar por sistemas solares como o da Terra, e a tentarem perceber como é que ocorrem diferentes configurações planetárias. Espera-se, com novos observatórios espaciais, nomeadamente o telescópio Europeu COROT de 2006 e o Kepler da NASA (em 2008), que possamos identificar muitos planetas como a Terra num futuro próximo.

Movimento no espaço O efeito Doppler também aparece frequentemente na astronomia, sempre que há matéria em movimento. Por exemplo, a luz provinda de um planeta em órbita de uma estrela distante iria exhibir desvios de Doppler. Quando o planeta se move em nossa direcção a frequência sobe, e à medida que ele se afasta a frequência da sua luz decai. Diz-se que a luz do planeta a aproximar-se está «desviada para o azul»; e quando ele se afasta ela está «desviada para o vermelho». Têm-se descoberto centenas de planetas em trono de estrelas distantes desde os anos 1990, ao encontrar-se este padrão impresso no brilho da estrela central.

Os desvios para o vermelho podem ser causados não só pelos movimentos orbitais de planetas mas também pela expansão do próprio universo, altura em que lhes chamamos desvios para o vermelho cosmológicos. Se o espaço entre nós e uma galáxia distante estiver a aumentar continuamente à medida que o universo se expande, isso é equivalente à galáxia se estar a mover para longe de nós a uma dada velocidade. Da mesma maneira, dois pontos na superfície de um balão a ser enchido parecem estar a afastar-se um do outro.

O resultado é que a luz da galáxia é desviada para frequências mais baixas, porque as ondas têm de viajar uma distância cada vez maior para chegarem até nós. Logo, galáxias muito distantes parecem ser mais vermelhas do que as que estão mais próximas. Se quisermos ser rigorosos, o desvio para o vermelho cosmológico não é um efeito de Doppler verdadeiro porque a galáxia que se está a afastar não está de facto a mover-se relativamente a quaisquer outros objectos próximos de si. A galáxia está fixa na sua vizinhança, e é o próprio espaço entre ela e nós que está, na realidade, a esticar-se.

Para seu crédito, o próprio Doppler viu que o efeito Doppler poderia ser útil para astrónomos, mas mesmo ele não poderia ter previsto quanto daí resultaria. Ele afirmou ter observado um registo do fenómeno nas cores da luz de estrelas emparelhadas, mas esses resultados foram contestados na altura. Doppler foi um cientista imaginativo e criativo, mas por vezes o seu entusiasmo superava as suas capacidades experimentais. Décadas mais tarde, porém, os desvios para o vermelho foram medidos em galáxias pelo astrónomo Vesto Slipher, estabelecendo as fundações para o desenvolvimento do modelo do *big bang* para o universo. E hoje, o efeito Doppler pode vir a ajudar a identificar mundos em torno de estrelas distantes que poderão até vir a revelar-se contendo vida.

a ideia resumida
Tom perfeito

20 A lei de Ohm

Porque é que vocês não correm perigo quando andam de avião durante uma trovoadas? Como é que os pára-raios salvam edifícios? Porque é que as lâmpadas em vossa casa não brilham menos de cada vez que vocês trocam uma delas? A lei de Ohm tem as respostas.

A electricidade surge graças ao movimento de cargas eléctricas. A carga eléctrica é uma das propriedades básicas das partículas subatómicas, que dita a forma como elas interagem com campos electromagnéticos. Estes campos criam forças que fazem mover partículas com cargas eléctricas. A carga, tal como a energia, é globalmente conservada; não pode ser criada nem destruída, mas pode ser movida de um sítio para outro.

A carga pode ser uma propriedade positiva ou negativa. Partículas com cargas opostas atraem-se umas às outras; as que têm cargas com sinais iguais repelem-se. Os electrões têm uma carga negativa (medida por Robert Millikan em 1909) e a dos prótons é positiva. No entanto, nem todas as partículas subatómicas têm carga. Os neutrões, como o nome sugere, não têm carga nenhum e são por isso «neutros».

Electricidade estática A electricidade pode ficar estática, por exemplo numa distribuição de cargas fixas, ou fluir, como numa corrente eléctrica. A electricidade estática cresce quando partículas carregadas se movem, de tal forma que cargas opostas acumulam-se em sítios diferentes. Se esfregarem um pente de plástico na vossa manga, por exemplo, ele fica carregado e pode atrair pequenos objectos que carreguem uma carga oposta, como pequenos pedaços de papel.

Cronologia

1752 D.C.

Franklin leva a cabo a sua experiência com relâmpagos

1826

Ohm publica a sua lei

BENJAMIN FRANKLIN 1706–90

Benjamin Franklin nasceu em Boston, nos EUA, o 15.º e mais novo dos filhos de um fabricante de velas. Embora pressionado para seguir uma vida no clero, Ben acabou por trabalhar como encadernador. Mesmo depois de Ben ter ficado famoso, continuou a assinar as suas cartas, modestamente, como «B. Franklin, Encadernador». Franklin publicou *Poor Richard's Almanac* que o tornou famoso graças a citações memoráveis, como «Os peixes e as visitas tresandam passados três dias.» Franklin foi um inventor prodigioso – inventou o pára-raios, a harmónica de vidro, as lentes bifocais e muitas outras coisas – mas estava

fascinado, acima de tudo, com a electricidade. Em 1752, efectuou a sua experiência mais famosa, extraindo faíscas de uma nuvem de tempestade ao fazer voar um papagaio durante uma tempestade. Nos seus últimos anos, Franklin contribuiu para a vida pública, introduzindo bibliotecas públicas, hospitais e bombeiros voluntários na América, e trabalhando para abolir a escravatura. Tornou-se político, levando a cabo missões diplomáticas entre os Estados Unidos, a Grã-Bretanha e a França durante e após a Revolução Americana. Foi um dos membros do Comité de Cinco que redigiu a Declaração de Independência em 1776.

Os relâmpagos formam-se de forma parecida, quando a fricção entre moléculas em nuvens de tempestade turbulentas acumula uma grande quantidade de electricidade, que é descarregada de repente num relâmpago. Essas faíscas colossais podem alcançar vários quilómetros de comprimento e dezenas de milhares de graus Celsius de temperatura.

Em movimento A corrente eléctrica, que usamos em nossas casas, é um fluxo de carga. Os fios metálicos conduzem electricidade porque nos metais os electrões não estão agarrados a nenhum núcleo atómico em particular e conseguem ser postos em movimento com facilidade. Por isso, diz-se que os metais são bons condutores de electricidade. Os electrões movem-se através de um fio metálico como água num cano. Em outros materiais, poderão ser cargas positivas que se movem. Quando se dissolvem produtos químicos na água, por exemplo, quer os electrões quer os núcleos carregados positivamente (iões) flutuam livremente. Os materiais condutores, como os metais, permitem que as cargas se movam com facilidade no seu interior. Aos materiais que não permitem que a electricidade passe através deles, como as cerâmicas ou

1909

Millikan mede a carga de um electrão individual

os plásticos, chamamos isolantes. Alguns materiais que só conduzem electricidade em certas circunstâncias chamam-se semicondutores.

Tal como a gravidade, uma corrente eléctrica pode ser criada por um gradiente, neste caso de um campo eléctrico ou de um potencial eléctrico.

De forma que, da mesma maneira que uma mudança em altura (potencial gravitacional) faz com que um rio desça colinas, uma mudança no potencial eléctrico entre as duas extremidades de um material condutor provoca um fluxo de carga nesse material. Esta «diferença de potencial», ou tensão, provoca o fluxo de corrente e dá também energia às cargas.

Resistência Quando cai um relâmpago, a descarga eléctrica flui muitíssimo depressa através do ar ionizado até ao chão. Ao fazê-lo, está a cancelar a diferença de potencial que o provocou, de forma que um relâmpago corresponde a uma corrente enorme. É a corrente enorme, e não a tensão, que pode matar-vos se atingir o vosso corpo.

Na prática, as cargas não conseguem mover-se àquelas velocidades imensas através da maior parte dos materiais, porque encontram resistência no seu caminho. A resistência limita o tamanho das correntes, ao dissipar energia eléctrica sob a forma de calor. Para evitarem ser mortos por um relâmpago poderiam ficar em cima de um tapete de borracha, que tem uma resistência muito elevada. Ou poderiam esconder-se dentro de uma gaiola de metal, porque o relâmpago conseguiria fluir mais facilmente através das barras de metal do que através do vosso corpo que, sendo na

maior parte feito de água, não é um bom condutor. Dá-se o nome de gaiola de Faraday a este dispositivo, devido a Michael Faraday, que construiu uma delas em 1836. O padrão de campo eléctrico que se estabelece numa gaiola de Faraday – que é um condutor oco – implica que toda a carga fique no exterior da gaiola, e dentro dela tudo fica completamente neutro. As gaiolas de Faraday foram dispositivos de segurança muito úteis aos cientistas do século XIX que trabalhavam com dispositivos de relâmpagos artificiais. Mesmo hoje em dia, continuam a proteger equipamento electrónico e explicam porque é que, quando estão a voar através de uma trovoadas num avião de

Em 1752, em Filadélfia, Benjamin Franklin conseguiu «extrair» electricidade de uma nuvem de tempestade, usando um papagaio

Relâmpagos

Podem ou não cair duas vezes no mesmo sítio mas, em média, há centenas de relâmpagos a atingirem a superfície da Terra a cada segundo que passa, ou cerca de 8,6 milhões de vezes por dia. Só nos Estados Unidos, cerca de 20 milhões de relâmpagos caem todos os anos, provenientes de 100 000 trovoadas.

metal, vocês estão em segurança – mesmo que o avião seja atingido em cheio por um relâmpago. Estão igualmente em segurança num carro de metal, desde que não estejam estacionados próximos de uma árvore.

Circuitos Os fluxos eléctricos seguem percursos fechados a que chamamos circuitos. O movimento da corrente e da energia através dos circuitos pode ser descrito da mesma forma que os fluxos de água através de uma série de canos. A corrente é similar ao caudal, a tensão à pressão da água e a resistência à largura do cano, ou às válvulas que lá se colocaram.

Georg Ohm publicou em 1826 uma das leis mais úteis para interpretar os circuitos. A lei de Ohm escreve-se sob forma algébrica como $V = IR$, o que significa que a queda em tensão (V) é igual ao produto da corrente (I) pela resistência (R). De acordo com a lei de Ohm, a tensão é proporcional à corrente e à resistência. Dupliquem a tensão num circuito e estarão a duplicar a corrente que está a passar nele, desde que a resistência tenha ficado na mesma; para manter a mesma corrente precisariam de uma resistência duas vezes maior. A corrente e a resistência estão inversamente relacionadas, de forma que aumentar a resistência trava a corrente. A lei de Ohm até se aplica a circuitos muito complicados, com muitos percursos. O circuito mais simples que se pode imaginar é uma lâmpada ligada, através de fios, a uma pilha. A pilha dá a diferença de potencial necessária para criar uma corrente que passa no fio, e o filamento de tungsténio da lâmpada dá alguma resistência quando converte energia eléctrica em luz e calor. O que aconteceria se vocês inserissem uma segunda lâmpada no circuito? De acordo com a lei de Ohm, se as duas lâmpadas fossem colocadas uma ao lado da outra vocês teriam duplicado a resistência, e portanto a tensão em cada uma delas, ou seja, a energia disponível para cada lâmpada ficaria reduzida a metade do valor inicial, o que faz com que ambas brilhem menos. Isto seria péssimo se estivessem a iluminar uma casa inteira – de cada vez que ligassem uma nova lâmpada numa sala as restantes iriam brilhar menos.

No entanto, se ligarem a segunda lâmpada num circuito fechado ligado directamente aos dois pólos da primeira lâmpada, consegue-se fazer com que cada uma delas sinta a totalidade da queda de tensão. A corrente separa-se na junção e passa através de ambas as lâmpadas individualmente, antes de se tornar a juntar, de forma que a segunda lâmpada brilha tanto quanto a primeira. A este circuito chamamos «paralelo». O outro, onde as resistências estão ligadas umas ao lado das outras, dizemos ser um circuito «em série». A lei de Ohm pode ser usada ao longo de um circuito para calcular as tensões e as correntes em qualquer ponto.

a ideia resumida

Teoria de circuitos

21 A regra da mão direita de Fleming

É possível que nos vossos passeios nocturnos de bicicleta já tenham usado um dínamo para darem electricidade aos faróis da vossa bicicleta. Há uma roda dentada a rodar encostada ao pneu, criando uma voltagem suficiente para abastecer duas lâmpadas. Quanto mais depressa vocês pedalarem mais brilhantes ficarão as luzes. Isto funciona porque houve uma corrente induzida no dínamo – e a direcção do fluxo dessa corrente é dada pela memorável regra da mão direita de Fleming.

“O próprio Faraday chamou à sua descoberta a magnetização da luz e a iluminação das linhas de força magnéticas.”

Pieter Zeeman, 1903

A indução electromagnética pode ser utilizada para alternarmos entre formas de campos eléctricos e magnéticos diferentes. É utilizada em transformadores que controlam a transmissão de energia ao longo da rede eléctrica, nos adaptadores de tomadas que usamos em viagens e até nos dínamos de bicicletas. Quando um campo magnético variável passa através de uma bobina de fio eléctrico, ele produz uma força sobre as cargas dentro do fio que faz com que elas se movam e provoca assim uma corrente eléctrica.

Dentro do pequeno cilindro de metal do dínamo estão escondidos um íman e uma bobina de fio. A barra externa que roda de encontro ao pneu faz girar um íman colocado dentro da bobina de fio. Como o íman em rotação produz um campo magnético variável, as cargas (electrões) dentro do fio começam a mover-se e criam uma corrente

Cronologia

1745 D.C.

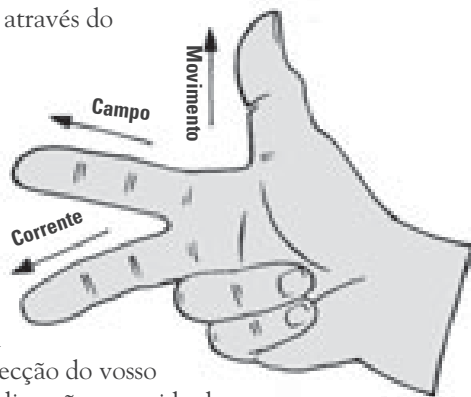
A garrafa de Leyden, um condensador, é inventada

1820

Ørsted estabelece a ligação entre electricidade e magnetismo

eléctrica. Diz-se que a corrente foi induzida na bobina através do fenómeno de indução electromagnética.

Regra do polegar A direcção da corrente induzida é dada pela regra da mão direita de Fleming, que leva o nome do engenheiro escocês John Ambrose Fleming. Estendam a vossa mão direita e apontem com o polegar para cima, com o indicador para a frente e o dedo maior a apontar para a esquerda, na perpendicular ao indicador. Para cargas a moverem-se segundo a direcção do vosso polegar, para cima, sujeitas a um campo magnético a apontar na direcção do vosso indicador, vai ser induzida uma corrente a apontar na direcção e sentido do dedo maior, todas as três direcções perpendiculares entre si. Esta regra é bastante fácil de relembrar, e muito útil.



Pode aumentar-se a corrente induzida enrolando o fio da bobina em voltas mais apertadas, de tal forma que o campo magnético muda de direcção mais vezes ao longo do fio, ou movendo o ímã mais depressa. É por causa disto que os dínamos das bicicletas dão mais luz quando vocês estão a andar mais depressa. Não importa se é o ímã que se está a mover, ou a bobina, desde que se estejam a mover um relativamente ao outro.

A relação entre o campo magnético variável e a força que ele induz está expressa na lei de Faraday. A força induzida, chamada força electromotriz (muitas vezes abreviada por f.e.m.), é dada pelo número de voltas de fio na bobina multiplicado pela taxa à qual o fluxo magnético (que aumenta com a intensidade do campo magnético e com a área da bobina) está a mudar. O sentido da corrente induzida é sempre contrário àquela que a gerou inicialmente (ao que se chama a lei de Lenz). Se assim não fosse, o sistema iria auto-amplificar-se e violar a conservação da energia.

Faraday A indução electromagnética foi descoberta por Michael Faraday nos anos de 1830. Faraday, um físico britânico, era famoso pelas suas experiências com electricidade. Ele não só mostrou que ímanes giravam ao flutuarem num recipiente de mercúrio, o que estabeleceu os princípios dos motores eléctricos, como também demonstrou que a luz é afectada por campos

1831

Faraday descobre a indução electromagnética

1873

Maxwell publica as suas equações do electromagnetismo

1892

Fleming publica a teoria dos transformadores

MICHAEL FARADAY 1791–1867

O físico britânico Michael Faraday auto-ensinou-se lendo livros enquanto trabalhava como aprendiz de encadernador. Enquanto jovem, Faraday assistiu a quatro aulas dadas pelo químico Humphry Davy na Royal Institution de Londres, e ficou tão impressionado que escreveu a Davy a pedir um emprego. Depois de ter sido inicialmente recusado, Faraday começou a trabalhar, passando a maior parte do seu tempo a ajudar outras pessoas na Royal Institution, mas trabalhando também em motores eléctricos. Em 1826, ele deu início às palestras nocturnas das sextas e às aulas de Natal da Royal Institution, ambas as quais ainda hoje se realizam. Faraday trabalhou

imenso em electricidade, descobrindo a indução electromagnética em 1831. Tornou-se reconhecido como um experimentalista muito competente e foi nomeado para várias posições oficiais, incluindo consultor científico da Trinity House, onde ajudou a instalar luz eléctrica em faróis. Surpreendentemente, talvez, Faraday recusou ser ordenado cavaleiro e a presidência da Royal Society (não uma, mas duas vezes). Quando a sua saúde se deteriorou, Faraday passou os seus últimos dias em Hampton Court, na casa que lhe foi oferecida pelo Príncipe Alberto, em reconhecimento pelas suas inúmeras contribuições para a ciência.

magnéticos. Ao rodar o plano de luz polarizada com um íman, ele deduziu que a própria luz devia ser electromagnética.

Até Faraday, os cientistas acreditavam que existiam muitos tipos de electricidade diferentes, que se manifestavam em situações diferentes. Foi Faraday quem mostrou que todos esses tipos de electricidade podiam ser descritos com base num único formalismo, que envolvia o

movimento de cargas. Faraday não era matemático, e já foi apelidado de «analfabeto matemático», mas ainda assim as suas ideias acerca de campos eléctricos e magnéticos foram adoptadas por James Clerk Maxwell, que as condensou na forma das suas quatro famosas equações, que continuam a ser um dos pilares de base da física moderna (ver a página 88).

“Nada é demasiado maravilhoso para ser verdadeiro se for consistente com as leis da natureza.”

Michael Faraday, 1849

Carga armazenada O nome de Faraday foi dado a uma unidade de carga eléctrica, o Farad, que caracteriza os condensadores. Os condensadores são componentes eléctricos que armazenam temporariamente carga, e são muitíssimo utilizados em circuitos. Por exemplo, o *flash* de uma câmara descartável armazena carga utilizando um condensador (enquanto esperamos que o luz do *flash* se acenda); ao carregarmos no botão da

câmara, libertamos a carga e cria-se o clarão do *flash*. Mesmo usando apenas uma pilha normal, a tensão que se acumula pode ser bastante grande, da ordem de centenas de volts, e dar-vos-ia um choque eléctrico valente se tocassem no condensador.

O condensador mais simples é feito por duas placas de metal paralelas mas separadas entre si por ar. Mas podem-se fazer «sanduíches» de praticamente qualquer coisa, desde que o «pão» seja condutor, ou armazene carga, e o «recheio» não. Os primeiros aparelhos para armazenamento de carga eléctrica surgiram no século XVIII e eram garrafas de vidro, chamadas «garrafas de Leyden», cuja superfície interna tinha sido forrada a metal. Hoje em dia, estas camadas em sanduíche são feitas de materiais como folha de alumínio, nióbio, papel, poliéster e Teflon. Se se liga um condensador a uma pilha e se fecha o circuito, acumulam-se cargas de sinais opostos em cada uma das placas. A corrente no circuito diminui porque a sua «pressão» reduz-se à medida que a diferença de cargas também diminui. Como demora tempo a carregar e a descarregar condensadores, eles podem atrasar muito o fluxo de corrente através de circuitos. Muitas vezes utilizam-se condensadores juntamente com indutores (que podem ser, por exemplo, bobinas de fio que poderão acrescentar correntes induzidas ao circuito) para se fazerem circuitos em que a carga eléctrica oscila de um lado para o outro.

Transformadores A indução electromagnética não é só utilizada por dínamos e por motores, mas também por transformadores eléctricos. Um transformador funciona gerando, em primeiro lugar, um campo magnético variável, e depois utilizando esse campo para gerar uma segunda corrente numa bobina próxima. Um exemplo simples de um transformador é um anel magnético com duas bobinas de fio diferentes enroladas em torno do anel. Aplica-se um campo eléctrico variável à primeira bobina, o que estabelece um campo magnético variável no íman. Este campo variável induz por sua vez uma nova corrente na segunda bobina.

Pela lei de Faraday, o tamanho da corrente induzida depende do número de voltas de fio na bobina, de forma que o transformador pode ser concebido para regular a intensidade da corrente à saída. Quando se põe electricidade a circular na rede eléctrica de um país, é mais eficiente e seguro enviá-la sob a forma de electricidade de corrente baixa e tensão elevada. Usam-se transformadores nas duas extremidades da rede, aumentando a tensão para reduzir a corrente para distribuição e baixando-a para uso doméstico. E, como vocês saberão por experiência própria se já tiverem tocado na caixa de um transformador de computador, os transformadores não são 100% eficientes, visto que aquecem, e por vezes, até fazem barulho, perdendo energia sob a forma de som, de vibrações e de calor.

a ideia resumida

Regras da indução

22 As equações de Maxwell

As quatro equações de Maxwell são uma das pedras basilares da física moderna, e o avanço científico mais importante desde a teoria da gravitação universal. Elas descrevem a forma como os campos eléctricos e magnéticos são dois lados da mesma moeda. Ambos os tipos de campos são manifestações do mesmo fenómeno – a onda electromagnética.

Os experimentalistas do início do século XIX observaram que a electricidade e o magnetismo podiam ser transformados um no outro. Mas James Clerk Maxwell completou um dos maiores sucessos da física moderna ao descrever todo o campo do electromagnetismo em apenas quatro equações.

Ondas electromagnéticas As forças eléctricas e magnéticas actuam sobre partículas carregadas e ímanes. Campos eléctricos variáveis geram campos magnéticos, e vice-versa. Maxwell explicou a forma como ambos os campos emergem do mesmo fenómeno: uma onda electromagnética, que possui características eléctricas e magnéticas. As ondas electromagnéticas contêm um campo eléctrico variável, acompanhado por um campo magnético que varia de forma parecida mas que é perpendicular ao primeiro.

Maxwell mediu a velocidade de ondas electromagnéticas a viajarem através do vácuo, demonstrando que era essencialmente a mesma que a velocidade da luz. Isto, combinado com os trabalhos de Hans Christian Ørsted e de Michael Faraday, confirmou que a luz era também uma

Cronologia

1600 d.c.

William Gilbert investiga a electricidade e o magnetismo

1752

Benjamin Franklin efectua as suas experiências com relâmpagos

1820

Ørsted estabelece a ligação entre electricidade e magnetismo

perturbação electromagnética que se propagava. Maxwell mostrou que as ondas luminosas, e todas as ondas electromagnéticas, se moviam no vácuo a uma velocidade constante de 300 milhões de metros por segundo. Esta velocidade é determinada pelas propriedades eléctricas e magnéticas absolutas do espaço livre.

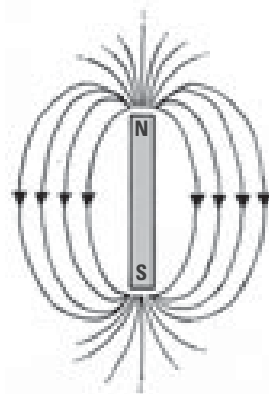
As ondas electromagnéticas têm uma gama de comprimentos de onda, e cobrem todo um espectro que se estende para lá da luz visível. As ondas de rádio têm os comprimentos de onda maiores (metros, ou mesmo quilómetros), a luz visível tem comprimentos de onda que são da mesma grandeza dos espaçamentos entre átomos, enquanto nas frequências mais elevadas deparamo-nos com os raios X e os raios gama. As ondas electromagnéticas são utilizadas sobretudo para comunicações, através da transmissão de ondas de rádio, de sinais de televisão ou de telemóveis. Também podem fornecer energia, como acontece nos fornos de microondas, e são muitas vezes usadas como sondas (por exemplo, fotografias a raios X em medicina, ou microscópios electrónicos).

A força electromagnética exercida pelos campos electromagnéticos é uma das quatro forças fundamentais, juntamente com a gravidade e as forças nucleares forte e fraca, e é a responsável pela coesão de átomos e moléculas. A força electromagnética é crucial para a química, onde estabelece ligações entre iões carregados para a formação de compostos e de moléculas.

Campos Maxwell começou por tentar compreender o trabalho de Faraday, que descrevia experimentalmente os campos eléctricos e magnéticos. Na física, os campos são a forma através da qual as forças são transmitidas à distância. A gravidade opera mesmo ao longo das imensas distâncias do espaço, e diz-se que produz um campo gravitacional. De forma similar, os campos eléctricos e magnéticos podem afectar partículas carregadas que estejam muito longe. Se já alguma vez brincaram com limalhas de ferro espalhadas numa folha de papel com um íman por baixo, terão reparado que a força magnética faz

“Não podemos evitar a conclusão de que a luz consiste nas ondulações transversais do mesmo meio que é a causa dos fenómenos eléctricos e magnéticos.”

James Clerk Maxwell, c. 1862



1831

Faraday descobre a indução electro-magnética

1873

Maxwell publica as suas equações do electromagnetismo

1905

Einstein publica a teoria da relatividade restrita

com que o pó de ferro se mova e forme contornos em forma de anel, que se prolongam do pólo norte para o pólo sul do íman. A intensidade do íman também se reduz à medida que vocês se afastam dele. Faraday tinha mapeado estas «linhas de campo», e encontrado algumas regras simples. Ele também descobriu linhas de campo similares em objectos carregados electricamente, mas não tinha treino matemático. De forma que coube a Maxwell tentar unir estas ideias dispersas sob a forma de uma teoria matemática.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + (\partial \mathbf{D} / \partial t)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -(\partial \mathbf{B} / \partial t)$$

Equações de Maxwell

Quatro equações Para surpresa de todos os cientistas da altura, Maxwell foi capaz de descrever todos os fenómenos electromagnéticos com apenas quatro equações fundamentais. Estas equações são hoje em dia tão famosas que chegam a aparecer em algumas t-shirts, seguidas pelo comentário, «e assim Deus criou a luz». Embora hoje pensemos em electricidade e magnetismo como sendo apenas uma coisa, o electromagnetismo, na altura esta ideia era radical e foi tão importante quanto seria se conseguíssemos hoje unificar a física quântica e a gravidade.

A primeira equação de Maxwell é a lei de Gauss, que descreve a forma e intensidade do campo eléctrico gerado por um objecto carregado. É uma lei do inverso do quadrado, matematicamente parecida com a lei da gravidade de Newton. Tal como a gravidade, o campo eléctrico diminui quando nos afastamos da superfície de um objecto carregado, em proporção com o quadrado da distância. De forma que o campo fica quatro vezes mais fraco se duplicarmos a distância a que estamos dele.

JAMES CLERK MAXWELL 1831–79

James Clerk Maxwell nasceu em Edimburgo, na Escócia. Cresceu no campo, onde se tornou muito curioso acerca do mundo natural. Depois de a sua mãe ter morrido, foi mandado para a escola em Edimburgo, onde lhe deram a alcunha de «tolinho», por estar sempre tão absorvido nos seus estudos. Enquanto estudante na Universidade de Edimburgo e mais tarde na de Cambridge, as pessoas julgavam que Maxwell era esperto, mas desorganizado. Depois de se ter graduado ele generalizou o trabalho de Michael Faraday acerca da electricidade e

magnetismo e condensou-o em equações. Maxwell regressou à Escócia quando o seu pai adoeceu e tentou arranjar um emprego em Edimburgo. Perdendo o concurso para o seu velho mentor, foi para o King's College em Londres, onde levou a cabo os seus trabalhos mais famosos. Por alturas de 1862, calculou a velocidade das ondas electromagnéticas e mostrou que era a mesma que a velocidade da luz, e 11 anos depois publicou as suas quatro equações do electromagnetismo.

Embora não haja provas científicas de que os sinais dos telemóveis façam mal à saúde, a lei do inverso do quadrado explica por que é capaz de ser mais seguro ter uma antena de telemóvel próxima da vossa casa, em vez de estar muito longe. O campo da antena transmissora decai rapidamente com a distância, de forma que quando chega até vós ele é muito fraco. Em contrapartida, o campo do telemóvel é intenso porque vocês o seguram muito próximo da vossa cabeça. Logo, quanto mais próxima estiver a antena, menos energia terá de usar o telemóvel potencialmente mais perigoso quando vocês estão a falar. Apesar disso, as pessoas são muitas vezes irracionais, e têm mais medo das antenas.

A segunda das equações de Maxwell descreve a forma e a intensidade do campo magnético, que é como quem diz o padrão das linhas de campo magnéticas, em torno de um íman. Afirma que as linhas de campo são sempre anéis fechados, desde o pólo norte até ao pólo sul. Por outras palavras, todos os ímanes têm de ter quer um pólo norte quer um pólo sul – não existem monopólos magnéticos e um campo magnético tem sempre um começo e um fim. Isto advém da teoria atómica, onde até átomos podem possuir campos magnéticos, e daí resulta magnetismo à grande escala se esses campos microscópicos estiverem todos alinhados. Se cortarem um íman em barra ao meio, ficam sempre com pólos norte e sul em cada metade da barra. Não importa como partam o íman ao meio, os pedaços mais pequenos contêm sempre ambos os pólos.

A terceira e quarta equações são parecidas uma com a outra, e descrevem a indução electromagnética. A terceira equação diz-nos a forma segundo a qual correntes variáveis produzem campos magnéticos, e a quarta como é que campos magnéticos variáveis produzem correntes eléctricas. Esta última é conhecida como a lei de Faraday da indução.

Conseguir descrever tantos fenómenos só com umas poucas equações simples foi um feito colossal, que levou Einstein a classificar a obra de Maxwell como estando a par da de Newton. Einstein tomou as ideias de Maxwell e estendeu-as ainda mais, nas suas teorias da relatividade. Nas equações de Einstein, o magnetismo e a electricidade eram manifestações da mesma coisa, vista por observadores em diferentes sistemas de referência; um campo eléctrico num referencial em movimento seria observado como sendo um campo magnético noutro referencial. Talvez tenha por isso sido Einstein quem tenha, em última análise, demonstrado que campos eléctricos e magnéticos são verdadeiramente uma única coisa.

Ao tentar fundir o electromagnetismo com a teoria quântica nos anos 1930, o físico britânico Paul Dirac previu a possível existência de monopólos magnéticos. Ainda não foram observados nenhuns, pelo que esta ideia continua por confirmar.

a ideia resumida

... e assim fez-se luz

23 A lei de Planck

Porque é que dizemos que uma coisa está aquecida ao rubro? E porque é que o aço fica vermelho, depois amarelo e depois branco ao ser aquecido? Max Planck explicou estas mudanças de cor ao juntar a física do calor com a física da luz. Ao descrever a luz de forma estatística, e não como uma onda contínua, a ideia revolucionária de Planck lançou as sementes da física quântica.

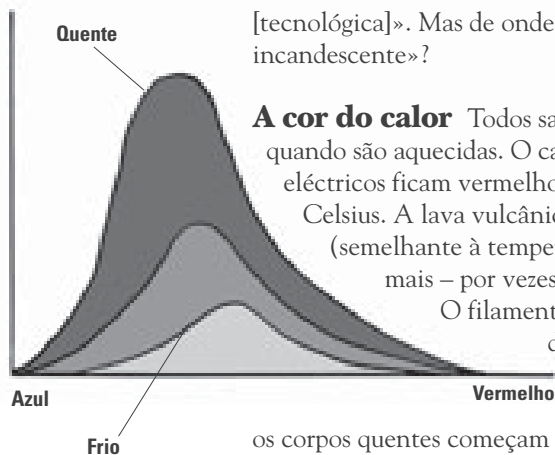
Num discurso famoso de 1963, o primeiro-ministro britânico Harold Wilson maravilhou-se com «o brilho incandescente desta revolução [tecnológica]». Mas de onde é que vem esta expressão, «brilho incandescente»?

A cor do calor Todos sabemos que há muitas coisas que brilham quando são aquecidas. O carvão dos churrascos e as resistências dos fornos eléctricos ficam vermelhos, atingindo temperaturas de centenas de graus Celsius. A lava vulcânica, que chega aos milhares de graus Celsius (semelhante à temperatura do aço derretido), pode brilhar ainda mais – por vezes laranja, amarela ou até branca, de tanto calor.

O filamento de tungsténio de uma lâmpada atinge mais de 3200 graus Celsius, o que é semelhante à temperatura da superfície de uma estrela.

De facto, com o aumento da temperatura,

os corpos quentes começam primeiro a brilhar com cor vermelha, depois amarela e eventualmente branca. A luz emitida parece ser branca porque foi adicionada mais luz azul à vermelha e amarela que já lá estavam. Esta dispersão de cores é descrita numa curva de corpo negro.



Cronologia

1862 D.C.

A expressão «corpo negro» é utilizada por Gustav Kirchoff

1901

Planck publica a sua lei da radiação do corpo negro

MAX PLANCK 1858–1947

Max Planck fez os seus estudos em Munique, na Alemanha. Com esperanças de seguir uma carreira em música, procurou obter de um músico conselhos acerca daquilo que deveria estudar, mas foi-lhe dito que, se precisava de fazer a pergunta deveria estudar algo de diferente. O seu professor de física não foi mais encorajador, dizendo-lhe que a física era uma ciência que estava completa e que nada mais poderia ser aprendido. Felizmente Planck ignorou-o e continuou a

sua investigação, instigando o conceito de quanta. A vida tardia de Planck foi marcada pelo sofrimento das mortes da sua mulher e vários filhos, incluindo dois filhos mortos nas guerras mundiais. Ainda assim, Planck continuou na Alemanha e tentou reconstruir a investigação em física no país, a seguir às guerras. Hoje em dia, há muitos institutos de pesquisa Max Planck de imenso prestígio, assim baptizados em sua honra.

As estrelas também seguem esta sequência: quanto mais quentes são, mais azuis parecem ser. O Sol, com os seus 6000 Kelvins, é amarelo, enquanto a superfície da gigante vermelha Betelgeuse (localizada na constelação de Órion) tem cerca de metade dessa temperatura. Estrelas ainda mais quentes, como Sirius, cuja superfície abrasadora chega aos 30 000 Kelvins, parecem ser de cor azul-esbranquiçada. À medida que a temperatura aumenta, é emitida cada vez mais luz azul de frequência elevada. De facto, a luz mais intensa das estrelas quentes é tão azul que a maior parte dela é irradiada na parte ultravioleta do espectro.

Radiação de corpo negro Os físicos do século dezanove ficaram surpreendidos ao descobrirem que a luz emitida por objectos aquecidos obedecia sempre ao mesmo padrão, independentemente da substância que eles testavam. A maior parte da luz era irradiada numa frequência específica. Quando a temperatura aumentava, a frequência de pico deslocava-se para comprimentos de onda mais azulados (mais curtos), passando do vermelho para o amarelo e daí para o azul-esbranquiçado.

‘[a teoria do corpo negro foi] um acto de desespero porque era necessário descobrir uma interpretação teórica a qualquer custo, não importa quão grande ele fosse.’

Max Planck, 1901

1905

Einstein identifica o fóton, e prova que a catástrofe do ultravioleta não ocorre

1996

Os dados do satélite COBE determinam com grande precisão a temperatura da radiação cósmica de fundo de microondas

O legado de Planck no espaço

O espectro de corpo negro mais perfeito que existe provém de uma fonte cósmica. O céu está banhado por um brilho ténue de microondas, que são um clarão remanescente da bola de fogo do próprio *big bang*, desviado para o vermelho, para frequências mais baixas, pela expansão do universo. Chamamos radiação cósmica de fundo de microondas a este brilho. Nos anos de 1990, o satélite COBE (COsmic Background Explorer) da NASA mediu a

temperatura desta luz – ela tem um espectro de corpo negro de 2,73 K, e é tão uniforme que continua a ser a mais perfeita curva de corpo negro alguma vez medida. Não há nenhum material na Terra que tenha uma temperatura tão precisa. A Agência Espacial Europeia homenageou recentemente Planck, ao decidir dar o seu nome ao seu novo satélite. Irá medir a radiação cósmica de fundo de microondas com uma precisão ainda maior.

Usamos a expressão radiação de corpo negro por uma boa razão. Os materiais escuros são os melhores para irradiar ou absorver calor. Se já usaram uma t-shirt negra num dia quente, saberão muito bem que ela aquece mais ao sol do que uma t-shirt branca. O branco reflecte melhor a luz do sol, razão pela qual as casas, em climas quentes, são muitas vezes pintadas de branco. A neve também reflecte a luz do sol. Os cientistas preocupam-se com o facto de que a Terra irá aquecer mais depressa se as calotes polares derreterem e reflectirem menos luz solar de volta ao espaço. Os corpos negros não só absorvem como também libertam calor mais depressa do que os brancos. É por isso que a superfície de fogões e estufas é pintada a negro – e não só para esconder a fuligem!

Uma revolução Embora os físicos tivessem medido os gráficos da radiação de corpo negro, não conseguiam percebê-los ou explicar porque é que a frequência atingia o seu máximo numa única cor. Alguns dos maiores pensadores da altura, como Wilhelm Wien, Lord Rayleigh e James Jeans, descobriram soluções parciais. Wien descreveu matematicamente a diminuição de intensidade nas frequências mais azuladas, enquanto Rayleigh e Jeans explicaram o aumento no espectro vermelho, mas ambas as fórmulas falhavam nas extremidades opostas. Em particular, a fórmula de Rayleigh e Jeans levantava problemas porque previa que se libertasse uma quantidade infinita de energia nos comprimentos de onda ultravioleta e acima deles, devido ao espectro em crescimento. Este problema óbvio foi baptizado de «catástrofe do ultravioleta».

Ao tentar compreender a radiação do corpo negro, o físico alemão Max Planck juntou as físicas do calor e da luz. Planck era um purista da física que gostava de partir dos fundamentos

mais básicos para derivar princípios físicos. Estava fascinado pelo conceito de entropia e pelo segundo princípio da termodinâmica. Considerava-os, juntamente com as equações de Maxwell, como leis fundamentais da natureza e propôs-se provar que estavam relacionados entre si. Planck tinha uma fé absoluta na matemática – se as suas equações lhe dissessem que algo era verdadeiro, não importava que todos os demais pensassem de forma diferente. Planck aplicou, com relutância, um truque engenhoso para fazer com que as suas equações funcionassem. A sua inspiração foi ter tratado a radiação electromagnética da mesma forma que os peritos da termodinâmica tratavam o calor. Da mesma maneira que a temperatura é a partilha da energia do calor por muitas partículas, Planck descreveu a luz distribuindo energia electromagnética por um conjunto de osciladores electromagnéticos, pequenas unidades subatómicas do campo electromagnético.

Para que a matemática funcionasse, Planck teve de considerar que a energia de cada unidade electromagnética era proporcional à frequência, de forma que $E = h\nu$, onde E é a energia, ν a frequência da luz e h é um factor constante de escala, hoje em dia chamado constante de Planck. Estas unidades chamam-se «quanta», do latim para «quantidade».

Neste novo enquadramento de quanta de energia, cada um dos osciladores electromagnéticos de frequências elevadas acumulava uma energia elevada. Logo, não seria possível ter muitos deles num dado sistema sem quebrar o limite de energia. Da mesma forma, se vocês recebessem o vosso salário mensal em 100 notas de valores variados, iriam receber sobretudo notas intermédias, mais umas quantas notas grandes e pequenas. Ao calcular a forma mais provável de partilhar a energia electromagnética pelos muitos osciladores, o modelo de Planck colocava a maior parte da energia nas frequências intermédias – o que coincidia com o espectro do corpo negro. Em 1901, Planck publicou esta lei, ligando ondas de luz a probabilidade, e foi imensamente aclamado. E não demorou muito a perceber-se que esta nova ideia resolvia o problema da «catástrofe do ultravioleta».

Os quanta de Planck eram apenas uma construção abstracta para resolver problemas na matemática da sua lei; ele não imaginou, nem sequer por um instante, que os seus osciladores pudessem ser reais. Mas, na altura em que a física atómica se estava a desenvolver a um ritmo velocíssimo, a nova formulação de Planck teve implicações surpreendentes. Planck tinha plantado a semente que cresceria e se tornaria numa das mais importantes áreas da física moderna: a teoria quântica.

a ideia resumida

Orçamento de energia

24 O efeito fotoelétrico

Quando a luz ultravioleta incide sobre uma placa de cobre, produz-se electricidade. Este efeito «fotoelétrico» foi um mistério, até Albert Einstein, inspirado pelo uso de quanta de energia por Max Planck, ter concebido a ideia de uma partícula de luz, ou fotão. Einstein mostrou que a luz se podia comportar como um jacto de balas de fotões, e também como uma onda contínua.

O começo do século XX abriu uma nova janela para a física. Era bem conhecido, no século XIX, que a luz ultravioleta fazia com que os electrões produzissem correntes num metal; compreender este fenómeno levou os físicos a inventar uma linguagem completamente nova.

Batedores azuis O efeito fotoelétrico gera correntes eléctricas nos metais quando eles são iluminados por luz azul ou ultravioleta, mas não por luz vermelha. Mesmo um feixe de luz vermelha muito intenso não consegue desencadear uma corrente. A carga só flui quando a frequência da luz excede um certo patamar, que varia de metal para metal. Esse patamar indica que é necessário acumular uma certa quantidade de energia antes de as cargas poderem ser deslocadas. A energia precisa para movê-las deveria provir da luz mas, no final do século XIX, não se conhecia o mecanismo através do qual isto sucedia.

‘**Há dois lados para qualquer questão.**’

Protágoras, 485-421 A.C.

Fotões Em 1905, Albert Einstein teve uma ideia radical para explicar o efeito fotoelétrico. Foi esse trabalho, e não a relatividade, que lhe valeu o Prémio Nobel em 1921. Inspirado pelo

Cronologia

1839 D.C.

Alexandre Becquerel observa o efeito fotoelétrico

1887

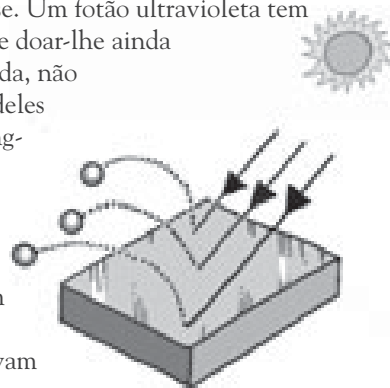
Hertz mede faíscas entre placas, causadas por luz ultravioleta

1899

J.J. Thomson confirma que a luz incidente gera electrões

uso prévio que Max Planck tinha feito dos quanta para distribuir a energia de átomos quentes, Einstein imaginou que a luz também poderia existir sob a forma de pequenos pacotes de energia. Einstein adoptou por completo a definição matemática dos quanta de Planck, ou seja, a proporcionalidade da energia e da frequência através da constante de Planck, mas aplicou-a à luz em vez de átomos. Os quanta de luz de Einstein vieram mais tarde a ser chamados de fótons. Os fótons não têm massa e movem-se à velocidade da luz.

Em vez de o metal estar a ser banhado com ondas de luz contínuas, Einstein sugeriu que «balas» de fótons individuais atingem os electrões do metal, fazendo com que eles se movam e produzindo o efeito fotoelétrico. Como cada fóton carrega uma certa energia, que aumenta com a sua frequência, a energia do electrão arrancado ao metal também vai aumentar com a frequência da luz. Um fóton de luz vermelha (com uma frequência baixa) não consegue transportar energia suficiente para arrancar um electrão, mas um fóton azul (luz com uma frequência maior) tem mais energia e consegue fazê-lo mexer-se. Um fóton ultravioleta tem ainda mais energia, e consegue assim chocar com um electrão e doar-lhe ainda mais velocidade. Aumentar a intensidade da luz não altera nada, não importa que vocês tenham mais fótons vermelhos se nenhum deles for capaz de deslocar os electrões. É como disparar bolas de ping-pong contra um jipe pesadíssimo. A ideia de quanta de luz de Einstein começou por ser impopular, porque ia contra a descrição ondulatória da luz que estava sumarizada nas equações de Maxwell, que a maior parte dos físicos reverava. No entanto, o clima mudou quando as experiências mostraram que a ideia doida de Einstein estava correcta. As experiências confirmaram que as energias dos electrões libertados aumentavam proporcionalmente à frequência da luz.



Dualidade onda-partícula A proposta de Einstein não só foi controversa como levantava a ideia muito desconfortável de que a luz fosse tanto uma onda quanto uma partícula, a que se chamou a dualidade onda-partícula. O comportamento da luz, até Maxwell ter escrito as suas equações, tinha sempre seguido o de uma onda, desviando-se em torno de obstáculos, sofrendo difracção, reflectindo-se e interferindo. Com a sua proposta, Einstein provocou um verdadeiro tremor de terra, ao mostrar que a luz também era um jacto de torpedos de fótons.

1901

Planck introduz o conceito de quanta de energia

1905

Einstein propõe a teoria dos quanta de luz

1924

De Broglie propõe que as partículas se podem comportar como ondas

ALBERT EINSTEIN 1879–1955

1905 foi um *annus mirabilis* para um físico nascido na Alemanha e a trabalhar em part-time como secretário no Gabinete Suíço de Patentes. Albert Einstein publicou três artigos de física na revista alemã *Annalen der Physik*. Esses artigos explicavam o movimento browniano, o efeito fotoelétrico e a relatividade restrita, e cada um deles era trabalho que desbravava fronteiras. A reputação de Einstein cresceu até, em 1915,

ele ter produzido a sua teoria da relatividade geral, confirmando ser um dos maiores cientistas de todos os tempos. Quatro anos mais tarde, as observações efectuadas durante um eclipse solar verificaram a sua teoria da relatividade geral e ele tornou-se mundialmente famoso. Em 1921, Einstein recebeu o Prémio Nobel pelo seu trabalho sobre o efeito fotoelétrico, que influenciou o desenvolvimento da mecânica quântica.

“A camada superficial do corpo é penetrada por quanta de energia cuja energia é convertida pelo menos parcialmente em energia cinética dos electrões. A concepção mais simples é que um quantum de luz transfere toda a sua energia a um único electrão.”

Albert Einstein, 1905

Os físicos continuam a debater-se com esta tensão. Hoje até sabemos que a luz parece saber se deve comportar de uma maneira ou de outra sob circunstâncias diferentes. Se prepararem uma experiência para medir as propriedades ondulatórias da luz, como por exemplo passá-la por uma rede de difracção, ela vai-se comportar como uma onda. Se em vez disso tentarem medir as suas propriedades de partícula, ela vai fazer-vos a vontade.

Os físicos tentaram criar experiências inteligentes capazes de desmascarar a luz, e talvez revelar a sua verdadeira natureza, mas até agora todas elas falharam. Muitas dessas experiências são variantes da experiência das duas fendas de Young, mas com componentes que se podem ligar ou desligar. Imaginem uma fonte de luz cujos raios passam através de duas fendas estreitas e iluminam um ecrã. Com ambas as fendas abertas, vocês iriam ver as bandas escuras e brilhantes, bem familiares dos fenómenos de interferência. Portanto, a luz, como bem sabemos, é uma onda. No entanto, se vocês diminuírem o suficiente a intensidade da luz, a certa altura o nível é tão baixo que os fotões começam a passar pelo aparelho um a um, e um detector consegue dar pelos brilhos que cada um deles faz ao atingir o ecrã. Mesmo que vocês façam isto, os fotões vão continuar a acumular-se no padrão de interferência às riscas. Então como é

que um fotão sozinho sabe se deve ir através desta ou daquela fenda para construir o padrão de interferência? Se forem velozes, podem fechar uma das fendas depois de o fotão ter deixado a fonte de luz, ou até depois de ele ter passado pelas fendas mas antes de ter atingido o ecrã. Em qualquer dos casos que os físicos têm sido capazes de testar, os fotões sabem se havia uma ou duas fendas quando passaram. E embora só estejam a passar fotões sozinhos, os resultados indicam que cada fotão parece passar simultaneamente por ambas as fendas.

Ponham um detector em frente de uma das fendas (de forma a que fiquem a saber que cada fotão passou através dessa fenda, ou da outra) e, estranhamente, o padrão de interferência desaparece – ficam com uma simples pilha de fotões no ecrã, e nenhuma banda de interferência. Logo, não importa como os tentem apanhar, os fotões parecem sempre saber como se devem comportar. E comportam-se simultaneamente como ondas e partículas, não apenas de uma das formas.

Ondas de matéria Em 1924, Louis-Victor de Broglie sugeriu a ideia inversa, de que partículas de matéria também se poderiam comportar como ondas. Ele propôs que todos os corpos têm um comprimento de onda associado, o que implicava que a dualidade onda-partícula era universal. Três anos depois, a ideia das ondas de matéria foi confirmada, quando se observaram electrões a sofrerem difracção e interferência, precisamente como a luz. Os físicos também já observaram partículas ainda maiores a comportarem-se como ondas, como por exemplo os neutrões, os protões e recentemente até moléculas, incluindo bolas de futebol microscópicas chamadas «buckyballs». Objectos maiores, como rolamentos e texugos, têm comprimentos de onda minúsculos, demasiado pequenos para poderem ser vistos, de forma que não conseguimos observá-los a comportarem-se como ondas. Uma bola de ténis em voo num *court* tem um comprimento de onda de 10^{-34} metros, muito mais pequeno do que a largura de um protão (10^{-15} metros).

Como vimos que a luz também é uma partícula e que os electrões por vezes são ondas, o efeito fotoelétrico descreveu uma volta completa.

células solares

O efeito fotoelétrico é hoje em dia utilizado em painéis solares onde a luz liberta electrões, regra geral provenientes de materiais semi-condutores, como o silício, em vez de metais puros.

a ideia resumida

Balas de fotões

25 A equação das ondas de Schrödinger

Como é que podemos dizer onde está uma partícula, se ela também se espalha, como uma onda? Erwin Schrödinger escreveu uma equação famosíssima que descreve a probabilidade de uma partícula estar num dado local ao comportar-se como uma onda. A sua equação veio a descrever os níveis de energia dos electrões nos átomos, lançando a química moderna e também a mecânica quântica.

De acordo com Einstein e Louis-Victor de Broglie, as partículas e as ondas estão intimamente relacionadas entre si. As ondas electromagnéticas, incluindo a luz, assumem ambas essas características, e até moléculas e partículas de matéria subatómicas podem difractor-se e interferir como ondas.

Mas as ondas são contínuas, e as partículas não. Então como é que podemos dizer onde está uma partícula se ela está dispersa, sob a forma de uma onda? A equação de Schrödinger, proposta pelo físico austríaco Erwin Schrödinger em 1926, descreve a probabilidade de uma partícula que se está a comportar como uma onda estar num determinado local, usando a física das ondas e a probabilidade. É uma das pedras basilares da mecânica quântica, a física do mundo atómico.

Cronologia

1897 D.C.

J.J. Thomson
descobre o electrão

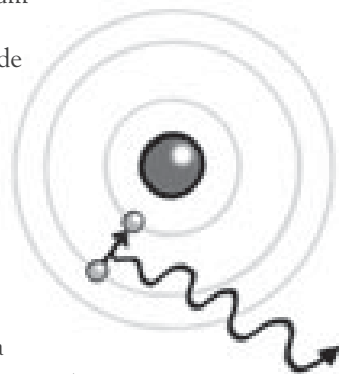
A primeira vez que a equação de Schrödinger foi usada foi para descrever as posições dos electrões num átomo. Schrödinger tentou descrever o comportamento de onda dos electrões e também incorporou o conceito de quanta de energia introduzido por Max Planck, a ideia de que a energia das ondas existe sob a forma de múltiplos de pacotes básicos, cuja energia é proporcional à frequência da onda. Os quanta são esses pacotes mais pequenos, e conferem uma granularidade intrínseca a qualquer onda.

O átomo de Bohr Foi o físico dinamarquês Niels Bohr quem aplicou a ideia de energia quantificada aos electrões de um átomo. Como os electrões se libertam facilmente dos átomos, e têm carga negativa, Bohr pensou que, tal como os planetas em órbita em torno do Sol, os electrões mantinham órbitas em torno do núcleo carregado positivamente. No entanto, os electrões só podiam possuir certas energias, que correspondiam a múltiplos dos quanta de energia básicos. Para os electrões dentro dos átomos, estes estados de energia deveriam restringir os electrões a ocuparem camadas (ou «níveis») diferentes, de acordo com a energia. Era como se os planetas só pudessem ocupar certas órbitas, definidas por regras de energia.

O modelo de Bohr foi um grande sucesso, sobretudo por conseguir explicar o átomo mais simples, o de hidrogénio. O hidrogénio só contém um electrão em órbita em torno de um único próton, uma partícula carregada positivamente que faz o papel do núcleo. A hierarquia de energias quantificadas de Bohr explicava conceptualmente os comprimentos de onda bem característicos da luz que era emitida e absorvida pelo hidrogénio.

Tal como se se tratasse de subir uma escada, ao transferir-se energia para o electrão do átomo de hidrogénio, ele pode saltar para o nível ou camada superior.

Para isso, o electrão tem de absorver a energia de um fóton com a energia exacta para o efeito. Ou seja, é necessário uma frequência particular de luz para elevar o nível de energia do electrão. Qualquer outra

**1913**

Bohr propõe que os electrões orbitam em torno dos núcleos

1926

Schrödinger concebe a sua equação de ondas

frequência não resultará. Alternativamente, se estimulado nesse sentido, o electrão pode saltar para baixo, para o nível inferior, emitindo um fóton de luz nessa frequência ao fazê-lo.

Impressões digitais espectrais Quando se deslocam electrões para cima, na escada das energias, um gás de hidrogénio pode absorver uma série de fótons com frequências bem características, correspondentes aos intervalos de energia entre os «degraus». Se se iluminar o gás com uma luz branca, estas frequências específicas são escurecidas, visto que a luz com essas frequências é absorvida. Pelo contrário, obtemos linhas brilhantes se o gás estiver quente e os electrões tiverem começado já nos degraus superiores. Estas energias características do hidrogénio podem ser medidas, e estão de acordo com as previsões de Bohr. Todos os átomos produzem linhas parecidas com estas, mas com energias características diferentes. De forma que essas linhas são como que impressões digitais que podem servir para identificar espécies químicas diferentes.

Funções de onda Os níveis de energia de Bohr funcionavam bem para o hidrogénio, mas menos bem para outros átomos com mais de um electrão e com núcleos mais pesados. Para

Encaixada

Uma partícula sozinha a flutuar livre no espaço tem uma função de onda que se parece com uma onda sinusoidal. Se a partícula estiver contida numa caixa, a sua função de onda tem de cair para zero nas paredes da caixa, e fora delas, porque não pode estar lá. A função de onda dentro da caixa pode ser determinada considerando os níveis de energia, ou quanta, permitidos à partícula, que terão de ser sempre maiores que zero. Como a teoria quântica só permite níveis de energia muito específicos, a partícula terá maior probabilidade de estar em alguns sítios do que noutros e haverá locais da caixa onde nunca se conseguirá encontrar a partícula, e onde a função de onda será zero. Sistemas mais complicados têm funções de onda que são combinações

de muitas ondas sinusoidais, e de outras funções matemáticas, como um tom musical feito de muitas harmónicas. Na física convencional usaríamos a física de Newton para descrever o movimento de uma partícula numa caixa (como por exemplo um berlinde pequeno). Num dado instante, saberíamos exactamente onde a partícula estava e a direcção segundo a qual se estava a mover. Na mecânica quântica, pelo contrário, só podemos falar da probabilidade de a partícula estar num dado sítio num certo instante e, como a quantização da energia se estabelece a escalas atómicas, haverá locais favorecidos onde se encontrará a partícula. Mas não conseguimos dizer com exactidão onde está a partícula, visto que ela também é uma onda.

“Deus opera o electromagnetismo usando a teoria das ondas à segunda, quarta e sexta, e o Diabo opera-o usando a teoria quântica à terça, quinta e sábado.”

Sir William Bragg, 1862–1942

mais, havia ainda a complicação de que, de acordo com De Broglie, os electrões também deveriam ser encarados como ondas. De forma que cada órbita de um electrão poderia igualmente ser considerada uma frente de onda. Mas pensar na órbita como uma onda significaria que era impossível dizer onde é que o electrão estava num dado instante.

Schrödinger, inspirado por De Broglie, escreveu uma equação que conseguia descrever a posição de uma partícula quando ela se estava a comportar como uma onda. Só o consegui fazer de forma estatística, ao incorporar conceitos de probabilidade. A equação de Schrödinger tem uma importância enorme, e é uma parte fundamental da mecânica quântica. Schrödinger introduziu a ideia de uma função de onda para exprimir a probabilidade de uma partícula estar num dado sítio a dada altura, e para incluir toda a informação que se pudesse saber acerca dessa partícula. As funções de onda são notoriamente difíceis de compreender porque nós não nos damos conta delas na nossa vida do dia-a-dia, e é muitíssimo difícil visualizá-las ou até interpretá-las do ponto de vista filosófico.

O grande desenvolvimento desencadeado pela equação de Schrödinger levou também a modelos de orbitais de electrões nos átomos. As orbitais são contornos de probabilidade, descrevendo regiões onde os electrões estão com 80-90% de certeza (o que levanta a questão de eles poderem estar, com probabilidade baixa, noutra sítio completamente diferente). Estes contornos acabam por não ser camadas esféricas, tal como tinha sido pensado por Bohr, tomando em vez disso formas mais esticadas, parecidas com halteres ou donuts. Os químicos de hoje em dia usam este conhecimento para criarem moléculas.

A equação de Schrödinger revolucionou a física, ao trazer a ideia da dualidade onda-partícula não só para os átomos mas para toda a matéria. Juntamente com Werner Heisenberg e outros, Schrödinger é realmente um dos pais fundadores da mecânica quântica.

a ideia resumida
Aqui, ali, mas não em
todos os sítios

26 O princípio da incerteza de Heisenberg

O princípio da incerteza de Heisenberg afirma que não é possível, num dado instante, determinar exactamente quer a velocidade (ou momento) quer a posição de uma partícula – quanto mais precisamente medirem uma delas, menos saberão acerca da outra. Werner Heisenberg propôs que o próprio acto de observar uma partícula muda-a, tornando impossível um conhecimento preciso. De forma que não se pode prever com certeza nem o comportamento passado nem o futuro de uma qualquer partícula subatômica. O determinismo morreu.

Em 1927, Heisenberg deu-se conta de que a teoria quântica continha algumas previsões estranhas. Implicava que as experiências nunca poderiam ser efectuadas em isolamento completo, porque o próprio acto de medir afectava o seu resultado. Ele exprimiu esta conexão no seu «princípio da incerteza» – não se pode medir simultaneamente quer a posição quer o momento de uma partícula subatômica (ou, de maneira equivalente, a sua energia num instante preciso). Se souberem uma delas, a outra terá sempre imensa imprecisão. É possível medir ambas as coisas dentro de certos limites, mas quanto mais se tentar estreitar esses limites para uma das grandezas, mais latos eles se tornarão para a outra. Esta

Cronologia

1687 D.C.

As leis do movimento de Newton implicam um universo determinístico

incerteza, defendeu ele, era uma consequência fundamental da mecânica quântica – não tinha nada a ver com uma falta de talento ou precisão das medições.

Incerteza Em qualquer medição, há um elemento de incerteza na resposta. Se medirem o comprimento de uma mesa com uma fita métrica, poderão dizer que a mesa mede um metro, mas a fita métrica só o pode afirmar com uma imprecisão de um milímetro, porque é esse o tamanho correspondente à risca mais pequena que lá está desenhada. De forma que a mesa poderia na verdade ter 99,9 centímetros ou 100,1 centímetros de comprimento, e vocês não saberiam.

É fácil pensar nas incertezas devidas às limitações dos vossos aparelhos de medida, como a fita métrica, mas a afirmação de Heisenberg é fundamentalmente diferente. Ele diz que é impossível saber exactamente quanto valem ambas as quantidades, momento e posição, ao mesmo tempo, não importa quão preciso seja o instrumento que vocês utilizem. É como se quando medissem a posição de uma nadadora vocês não pudessem saber a velocidade dela nesse mesmo instante. Podiam saber ambas as coisas aproximadamente, mas assim que determinassem precisamente uma delas a outra tornava-se mais incerta.

Medição Como é que surge este problema? Heisenberg pensou numa experiência que media o movimento de uma partícula subatômica, por exemplo um neutrão. Podia-se usar um radar para acompanhar a trajectória da partícula, fazendo reflectir ondas electromagnéticas no neutrão. Para se ter o máximo de precisão poderíamos escolher raios gama, que têm comprimentos de onda muito pequenos. No entanto, devido à dualidade onda-partícula, o raio gama que embate contra o neutrão actuará como se fosse uma série de balas de fotões. Os raios gama têm frequências muito altas, e por isso cada fotão carrega uma grande quantidade de energia. Quando um fotão cheio de energia colidissem com o neutrão iria dar-lhe um grande empurrão que alteraria a sua velocidade. Logo, mesmo que vocês soubessem qual era a posição do neutrão nesse instante, a sua velocidade iria mudar de forma imprevisível devido ao próprio processo de observação.

Se usassem fotões mais moderados, com energias mais baixas, para minimizar a mudança de velocidades, os seus comprimentos de onda seriam maiores e por isso a precisão com a qual conseguiriam medir a posição iria degradar-se. Não importa como tentem otimizar a experiência, não se pode descobrir simultaneamente qual a posição e a velocidade da partícula.

1901

A lei de Planck utiliza técnicas estatísticas

1927

Heisenberg publica o seu princípio da incerteza

WERNER HEISENBERG 1901–76

Werner Heisenberg viveu na Alemanha durante duas guerras mundiais. Um adolescente durante a Primeira Guerra Mundial, Heisenberg aderiu a um movimento juvenil alemão militarizado, que encorajava actividades ao ar livre e exercícios, de uma forma muito organizada. Heisenberg trabalhou em quintas durante o Verão, usando esse tempo para estudar matemática. Estudou física teórica na Universidade de Munique, descobrindo que era difícil escolher entre o seu amor pela província e pelo mundo abstracto da ciência. Depois do seu doutoramento, Heisenberg ocupou posições académicas e conheceu Einstein numa visita a Copenhaga. Em 1925, Heisenberg inventou a primeira forma da mecânica quântica,

conhecida como mecânica de matrizes, ganhando o Prémio Nobel por esse trabalho em 1932. Hoje em dia é sobretudo conhecido pelo princípio da incerteza, formulado em 1927.

Durante a Segunda Guerra Mundial, Heisenberg dirigiu o fracassado projecto nuclear alemão, e trabalhou num reactor de fissão nuclear. É discutível se a incapacidade alemã de construir uma arma nuclear foi deliberada ou se simplesmente se deveu a uma falta de recursos. Após a guerra, foi preso pelos Aliados e mantido em Inglaterra juntamente com outros cientistas alemães, tendo depois regressado à investigação na Alemanha.

Há um limite intrínseco e fundamental expresso no princípio da incerteza de Heisenberg. Na realidade, o que se está a passar é mais difícil de compreender, devido ao comportamento conjunto onda-partícula das partículas subatómicas e das ondas electromagnéticas. As definições de posição, momento, energia e tempo de uma partícula são, todas elas, probabilísticas. A equação de Schrödinger descreve a probabilidade de uma partícula estar num dado local ou de ter uma certa energia de acordo com a teoria quântica, tudo isso incorporado na função de onda de uma partícula, que descreve todas as suas propriedades.

$$\Delta x \Delta p > \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta E \Delta t > \frac{\hbar}{2}$$

**O princípio da incerteza
de Heisenberg**

Heisenberg estava a trabalhar na teoria quântica ao mesmo tempo que Schrödinger. Schrödinger preferia investigar os aspectos ondulatórios dos sistemas subatómicos, enquanto Heisenberg trabalhava na natureza discreta das energias. Ambos os físicos desenvolveram maneiras de descrever matematicamente os sistemas quânticos de acordo com os seus próprios preconceitos; Schrödinger usando a matemática das ondas e Heisenberg usando matrizes, ou tabelas bidimensionais de números, como forma de escrever os conjuntos de propriedades.

‘Quanto mais precisamente é determinada a posição, menos precisamente se conhece o momento neste instante, e vice-versa.’

Werner Heisenberg, 1927

As interpretações em termos de matrizes e ondas tinham ambas os seus seguidores, e ambos os campos julgavam que o outro grupo estava errado. Acabaram por juntar esforços e criaram uma descrição conjunta da teoria quântica, que veio a ser conhecida como mecânica quântica. Foi ao tentar formular estas equações que Heisenberg reparou em incertezas que não desapareciam. Chamou a atenção de um colega, Wolfgang Pauli, para estas incertezas numa carta em 1927.

Indeterminismo As imensas implicações do princípio da incerteza não passaram despercebidas a Heisenberg, e ele fez notar a forma como elas abalavam a física convencional. Em primeiro lugar, implicava que o comportamento passado de uma partícula subatômica não estava constringido até ser efectuada uma medição desse comportamento. De acordo com Heisenberg, «o caminho só começa a existir quando o observamos». Não temos maneira de saber onde algo está até a medirmos. Ele também observou que o percurso futuro de uma partícula não pode, da mesma maneira, ser previsto. Devido a estas incertezas fundamentais acerca da posição e velocidade da partícula, o futuro também era imprevisível.

Ambas as afirmações constituíam uma divergência fundamental relativamente à física newtoniana da altura, que assumia que o mundo externo existia de forma independente e que só cabia ao observador de uma experiência ver a verdade subjacente. A mecânica quântica mostrou que, ao nível atómico, uma tal visão determinista não fazia sentido e que em vez disso só se podia falar de probabilidades de resultados. Já não poderíamos falar de causa e efeito, mas apenas de probabilidades. Einstein, e muitos outros, acharam que isto era difícil de aceitar, mas tiveram de concordar que era o que as equações mostravam. Pela primeira vez, a física deslocou-se muito para lá do laboratório da experiência, instalando-se firmemente no reino da matemática abstracta.

a ideia resumida
Conhece os teus limites

27 A interpretação de Copenhaga

As equações da mecânica quântica davam aos cientistas as respostas correctas, mas o que é que elas significavam?

O físico dinamarquês Niels Bohr desenvolveu a interpretação de Copenhaga da mecânica quântica, juntando a equação das ondas de Schrödinger e o princípio da incerteza de Heisenberg. Bohr defendeu que não existe nenhuma experiência isolada – que as intervenções do observador fixam o resultado de experiências quânticas. Ao fazê-lo, desafiou a própria objectividade da ciência.

Em 1927, havia imensas visões da mecânica quântica em competição. Erwin Schrödinger defendia que a física das ondas estava subjacente ao comportamento quântico, que podia ser completamente descrito usando equações de ondas. Werner Heisenberg, por outro lado, acreditava que a natureza de partículas das ondas electromagnéticas e da matéria, descrita na sua representação em tabelas de matrizes, era de suma importância para se compreender a natureza. Heisenberg tinha também mostrado que a nossa compreensão estava limitada a um nível fundamental pelo seu princípio da incerteza. Ele acreditava que quer o passado quer o futuro eram impossíveis de conhecer até serem fixados pela observação, devido à incerteza intrínseca a todos os parâmetros que descrevem os movimentos de uma partícula subatômica.

Havia um outro homem que estava a tentar reunir todas as experiências e teorias e construir um novo enquadramento que conseguisse explicar tudo.

Cronologia

1901 D.C.

Planck publica a sua lei da radiação do corpo negro

1905

Einstein usa quanta de luz para explicar o efeito fotoeléctrico

NIELS BOHR 1885–1962

Niels Bohr atravessou duas guerras mundiais e trabalhou com alguns dos melhores físicos do mundo. O jovem Niels dedicou-se à física na Universidade de Copenhaga, realizando experiências de física no laboratório de fisiologia do seu pai, que lhe valeram prémios. Mudou-se para Inglaterra após o seu doutoramento, mas deu-se mal com J.J. Thomson. Depois de ter trabalhado com Ernest Rutherford em Manchester, regressou a Copenhaga e completou o seu trabalho no «átomo de Bohr» (que continua a ser a forma como a maior parte das pessoas pensa no

átomo, mesmo hoje em dia). Ganhou o Prémio Nobel em 1922, mesmo antes de a mecânica quântica ter aparecido em pleno. Para escaparem à Alemanha de Hitler nos anos 1930, imensos cientistas acorreram ao Instituto de Física Teórica de Bohr, em Copenhaga, onde ficaram alojados numa mansão doada por Carlsberg, o fabricante de cervejas. Quando os Nazis ocuparam a Dinamarca em 1940, Bohr fugiu num barco de pesca para a Suécia, e depois para a Inglaterra.

Era Niels Bohr, da Universidade de Copenhaga, o cientista que tinha explicado os estados quânticos de energia dos electrões no átomo de hidrogénio. Bohr, juntamente com Heisenberg, Max Born e outros, desenvolveu uma perspectiva holística da mecânica quântica que veio a ser conhecida como a interpretação de Copenhaga. Continua a ser a interpretação favorita da maior parte dos físicos, embora já tenham sido sugeridas outras variantes.

Dois lados Bohr atacou a nova ciência com uma abordagem filosófica. Destacou em particular o impacto que os próprios observadores têm nos resultados de experiências quânticas. Primeiro, ele aceitou a ideia de «complementaridade», ou seja, que os lados de onda e partícula da matéria e da luz eram duas faces do mesmo fenómeno subjacente, e não duas famílias separadas de acontecimentos. Da mesma maneira que as imagens num teste psicológico podem mudar de aparência dependendo da forma como se olha para elas – duas linhas onduladas uma ao lado da outra poderão parecer o contorno de um vaso ou dois rostos a olharem um para o outro –, as propriedades de onda e de partícula são formas complementares de olhar para o mesmo fenómeno. Não era a luz que mudava o seu carácter, mas sim a forma como nós decidíamos olhar para ela.

1927

Heisenberg publica o seu princípio da incerteza e a interpretação de Copenhaga é formulada

Para superar o fosso entre sistemas quânticos e normais, incluindo as nossas próprias experiências a escalas humanas, Bohr também introduziu o «princípio da correspondência», ou seja, que o comportamento quântico deverá desaparecer para sistemas grandes com os quais estamos familiarizados, e para os quais a física newtoniana é adequada.

«Estamos numa selva e encontramos o nosso caminho por tentativa e erro, construindo a estrada que deixamos para trás à medida que progredimos.»

Max Born, 1882–1970

Impossibilidade de saber Bohr deu-se conta da importância fulcral do princípio da incerteza, que afirma que não se pode medir a posição e o momento (ou velocidade) de qualquer partícula subatômica ao mesmo tempo. Se se mede uma das quantidades com precisão, então a outra é inerentemente incerta. Heisenberg pensava que essa incerteza surgia devido aos detalhes do próprio acto de medida. Para medir algo, mesmo que seja apenas olhar para o objecto, temos de fazer reflectir fotões nessa coisa. Como isto envolve sempre a transferência de algum momento ou energia, conclui-se que este acto de observação perturbou o movimento original da partícula.

Bohr, por outro lado, pensava que a explicação de Heisenberg tinha falhas. Defendeu que não se podia nunca separar por completo o observador do sistema que ele ou ela estava a medir. Era o acto de observação propriamente dito que fixava o comportamento final do sistema, através do comportamento probabilístico de onda-partícula da física quântica, e não uma simples transferência de energia. Bohr acreditava que o comportamento de um sistema completo tinha de ser considerado como um todo; não se podia separar a partícula, o radar ou mesmo os próprios observadores. Mesmo quando olhamos para uma maçã, temos de considerar as propriedades quânticas do sistema inteiro, incluindo o sistema visual no nosso cérebro que processa os fotões da maçã.

Para Bohr, também a própria expressão «observador» está errada, porque invoca uma imagem de um espectador externo separado do mundo que está a ser contemplado. Um fotógrafo como Ansel Adams pode capturar a natureza virgem da vastidão do Yosemite, mas a paisagem está de facto intocada pelo homem? Como poderá estar se o fotógrafo também lá está? A imagem real é a de um homem no meio da natureza, não separado dela. Para Bohr, o observador era sem dúvida parte da experiência.

Este conceito de participação do observador foi chocante para os físicos, porque ia contra a maneira como a ciência sempre tinha sido feita e contra o conceito fundamental de objectividade científica. Os filósofos também não gostaram. A natureza deixava de ser mecânica e previsível e era impossível de ser conhecida. O que é que isto significava para conceitos de verdade básicos, já para não dizer ideias simples como o passado e o futuro?

Einstein, Schrödinger e outros não conseguiram abandonar as suas crenças firmes num universo externo, determinista e verificável. Einstein acreditava que, uma vez que só podia ser descrita através da estatística, a teoria da mecânica quântica tinha de estar, pelo menos, incompleta.

O colapso das funções de onda Dado que observamos partículas e ondas subatômicas como uma ou outra entidade, o que é que decide a forma como elas se manifestam? Porque é que a luz que passa por duas fendas interfere como ondas na segunda-feira, mas muda para comportamento de partículas na terça se tentarmos apanhar o fóton quando ele passa por uma das fendas? De acordo com Bohr e os apoiantes da interpretação de Copenhaga, a luz existe em ambos os estados simultaneamente, quer como onda quer como partícula. Só veste um dos dois fatos quando é medida. De forma que somos nós que escolhemos de antemão o resultado, ao decidirmos como gostaríamos de medir.

Na tomada de decisão, quando se fixa o carácter de partícula ou onda, dizemos que a função de onda colapsou. Todas as probabilidades de resultados possíveis contidas na função de onda de Schrödinger desabam de tal forma que se perde tudo aquilo que não seja o resultado final. Então, de acordo com Bohr, a função de onda original de um feixe de luz contém em si todas as possibilidades, quer a luz apareça na sua forma de ondas ou de partículas. Quando fazemos a medição a luz aparece-nos sob uma dada forma, não porque mude de um tipo de substância para outro, mas sim porque é, efectivamente, ambas as coisas ao mesmo tempo. Maçãs e laranjas quânticas não são na verdade nenhuma das coisas separadamente, mas sim um híbrido de ambas.

Os físicos continuam a ter dificuldades em compreender intuitivamente o que significa a mecânica quântica, e outros depois de Bohr arranjam novas formas de a interpretar. Bohr defendeu que tínhamos de começar do zero para podermos compreender o mundo quântico, e que não poderíamos usar conceitos que nos são familiares da vida quotidiana. O mundo quântico é algo de diferente, estranho e nada familiar, e temos de aceitá-lo.



“Quem não se choque com a teoria quântica não a percebeu.”

Niels Bohr, 1885–1962

a ideia resumida
Vocês escolhem

28 O gato de Schrödinger

O gato de Schrödinger está vivo e morto ao mesmo tempo. Nesta experiência hipotética, um gato dentro de uma caixa pode ou não ter sido morto por uma cápsula de veneno, dependendo de um gatilho aleatório. Erwin Schrödinger usou esta metáfora para mostrar o quão ridícula ele achava a interpretação de Copenhaga da teoria quântica, que previa que, até que o resultado fosse efectivamente observado, o gato deveria estar num estado de limbo, quer vivo quer morto.

Na interpretação de Copenhaga da mecânica quântica, os sistemas quânticos existem numa nuvem de probabilidades até que um observador carregue num botão e seleccione um resultado para a sua experiência. Antes de ser observado, o sistema assume todas as possibilidades. A luz é quer partícula quer onda, até que nós escolhamos qual das formas queremos medir – e então ela adopta essa forma.

Embora uma nuvem de probabilidade possa parecer um conceito plausível para uma entidade abstracta como um fóton ou onda de luz, o que é que significaria para algo maior, que possamos observar e dar-mo-nos conta de que existe? Qual é realmente a natureza desta indefinição quântica?

Em 1935, Erwin Schrödinger publicou um artigo com uma experiência hipotética que tentava ilustrar este comportamento com um exemplo mais folclórico e familiar do que partículas subatómicas. Schrödinger era um crítico acérrimo da perspectiva de Copenhaga em que o acto de observação

Cronologia

1927 D.C.

Interpretação de Copenhaga da mecânica quântica

1935

A experiência do gato de Schrödinger é proposta

influenciava o resultado dessa mesma observação. Ele queria mostrar o quão estúpida a interpretação de Copenhaga era.

Limbo quântico Schrödinger considerou a seguinte situação imaginária. Não se magoaram animais nenhuns.

«Um gato está sentado numa câmara de metal, juntamente com o seguinte dispositivo diabólico (que deve estar seguro contra qualquer interferência directa por parte do gato): num contador Geiger há uma pequena porção de uma substância radioactiva, tão pequena que é possível que no intervalo de uma hora só um dos seus átomos decaia, mas também é possível, com igual probabilidade, que não decaia nenhum; se isso acontecer, o tubo contador dá uma descarga e através de uma série de ligações liberta um martelo que parte um pequeno frasco de ácido cianídrico. Se deixarmos este sistema sozinho durante uma hora, diríamos que o gato ainda estaria vivo se no entretanto nenhum átomo tiver decaído. O primeiro decaimento atómico irá envenená-lo.»



De forma que há uma probabilidade de 50:50 de o gato estar vivo (esperemos!) ou morto quando se abre a caixa passada uma hora. Schrödinger argumentou que, seguindo a lógica da interpretação de Copenhaga, teríamos que pensar no gato a existir numa mistura difusa de estados, estando vivo e morto ao mesmo tempo enquanto a caixa estivesse fechada. Da mesma maneira que o carácter de onda ou de partícula de um electrão só é fixado na altura da detecção, o futuro do gato só é determinado quando decidimos abrir a caixa e olhar lá para dentro. Ao abrir a caixa, fazemos a observação e o resultado fica determinado.

É claro, resmungou Schrödinger, que isto era ridículo, sobretudo para um animal real como um gato. Da nossa experiência quotidiana sabemos que o gato está ou vivo ou morto, e não uma mistura das duas coisas, e é uma maluquice imaginar que ele estava num estado de limbo só porque não estávamos a olhar para o bichano. Se o gato sobrevivesse, tudo aquilo de que se lembraria seria ter estado dentro da caixa, bem vivo, e não de ser uma nuvem de probabilidade, ou função de onda.

Einstein, entre outros, concordou com Schrödinger em como a interpretação de Copenhaga era absurda. Juntos, colocaram ainda mais questões. Como animal, o gato era capaz de se

1957

Everett sugere a hipótese dos muitos mundos

observar a si mesmo, e dessa forma colapsar a sua própria função de onda? O que é necessário para se ser um observador? É preciso que o observador seja um ser consciente, como um ser humano, ou qualquer animal serviria? E que tal uma bactéria? Indo ainda mais longe, poderíamos começar a questionar se uma coisa qualquer existe independentemente de estar a ser observada por nós. Se ignorarmos o gato dentro da caixa e pensarmos só na partícula em decaimento radioactivo, terá ela decaído ou não, se mantivermos a caixa fechada? Ou será que ela está num limbo quântico até abrirmos a tampa da caixa, como requer a interpretação de Copenhaga? Talvez o mundo inteiro esteja num estado misturado difuso, e nada se resolva até que nós o observemos, provocando dessa maneira o colapso da função de onda. Será que o lugar onde trabalhamos se desintegra quando estamos fora durante o fim-de-semana, ou será que está protegido pelos olhares das pessoas que passam por lá? Se não estiver ninguém a olhar para ela, será que a casa de férias no meio do bosque existe realmente? Ou ficará à espera numa mistura de estados de probabilidade, uma sobreposição das possibilidades de ter ardido, sido inundada, invadida por formigas e ursos, ou simplesmente estando lá quieta e tranquila, até alguém lá voltar? Por mais estranho que possa parecer, é assim que a interpretação de Copenhaga proposta por Bohr explica o mundo à escala subatômica.

ERWIN SCHRÖDINGER 1887–1961

O físico austríaco Erwin Schrödinger dedicou-se à mecânica quântica, e tentou (e falhou), com Einstein, unificar a gravidade e a mecânica quântica numa teoria única. Preferia interpretações em termos de ondas e não gostava da dualidade onda-partícula, o que o levou a conflitos com outros físicos.

Enquanto criança, Schrödinger adorava poesia alemã, mas ainda assim decidiu seguir física teórica na universidade. Enquanto participava na frente Italiana durante a Primeira Guerra Mundial, Schrödinger continuou o seu trabalho à distância e chegou a publicar artigos, regressando depois à vida académica. Schrödinger propôs a sua equação das ondas em 1926, pela qual lhe foi atribuído o Prémio Nobel, com Paul Dirac, em

1933. Schrödinger mudou-se então para Berlim para dirigir o velho departamento de Max Planck, mas com a chegada de Hitler ao poder em 1933 decidiu deixar a Alemanha. Achou difícil estabelecer-se, tendo trabalhado durante algum tempo em Oxford, Princeton e Graz. Com a anexação da Áustria em 1938, tornou a fugir, acabando por adoptar uma posição criada especialmente para ele no novo Instituto para Estudos Avançados em Dublin, na Irlanda, onde permaneceu até se reformar em Viena. A vida pessoal de Schrödinger foi tão complicada quanto a sua vida profissional; teve filhos com diversas mulheres, uma das quais viveu consigo e com a sua esposa durante algum tempo em Oxford.

Muitos mundos O problema filosófico das observações determinarem resultados levou a uma outra variação da interpretação da teoria quântica – a hipótese dos muitos mundos. Sugerida em 1957 por Hugh Everett, esta perspectiva alternativa evita a indeterminação de funções de onda não-observadas, dizendo em vez disso que existe um número infinito de universos paralelos. De cada vez que se faz uma observação, e se determina um resultado específico, separa-se um universo novo. Cada universo é exactamente igual aos outros, a não ser por aquela coisa que acabou de mudar. De forma que as probabilidades são todas iguais, mas o desenrolar dos acontecimentos faz-nos evoluir através de uma série de universos ramificados.

Numa interpretação de muitos mundos da experiência do gato de Schrödinger, quando se abre a caixa o gato já não está numa sobreposição de todos os estados possíveis. Em vez disso, o gato está ou vivo num universo ou morto noutro universo paralelo. Num dos universos o veneno liberta-se, no outro não.



É discutível se isto é melhor que estar-se num limbo de funções de onda. Podemos estar a evitar a necessidade de um observador para não termos de, por vezes, ser apenas uma nuvem de probabilidades, mas o custo é invocar uma série de universos alternativos onde as coisas são só ligeiramente diferentes. Num universo sou uma estrela de rock, noutra sou apenas um artista de rua. Ou então num universo tenho meias pretas, noutro cinzentas. Isto parece ser um desperdício de muitos bons universos. Outros universos alternativos poderiam ser mais significativos – num deles Elvis ainda está vivo, noutro John F. Kennedy não foi assassinado, noutro Al Gore foi eleito presidente dos EUA. Esta ideia tem sido muito utilizada nos argumentos de filmes, como por exemplo *Sliding Doors*, em que Gwyneth Paltrow vive duas vidas paralelas em Londres, uma bem sucedida, a outra não.

Alguns físicos contemporâneos dizem que o raciocínio de Schrödinger acerca do seu gato metafórico não era válido. Tal como a sua teoria baseada exclusivamente em ondas, ele estava a tentar aplicar ideias familiares da física ao mundo bem estranho do quântico, em que não temos outra alternativa senão aceitar que lá por baixo as coisas são mesmo esquisitas.

a ideia resumida
Morto ou vivo?

29 O paradoxo EPR

A mecânica quântica sugere que a informação pode ser transmitida instantaneamente entre sistemas, não importando a distância a que eles estejam. Este entrelaçar implica grandes teias de interconectividade entre partículas ao longo do universo. Einstein, Podolsky e Rosen julgavam que isto era absurdo e puseram em causa esta interpretação com o seu paradoxo. As experiências mostram que o entrelaçamento quântico é verdadeiro, o que abre a possibilidade de aplicações à criptografia quântica, a computadores quânticos e até ao teletransporte.

Albert Einstein nunca aceitou a interpretação de Copenhaga da mecânica quântica, que defendia que os sistemas quânticos existem num limbo probabilístico até serem observados, altura em que adoptam o seu estado final. Antes de ser filtrado pela observação, o sistema existe sob a forma de uma combinação de todos os seus estados possíveis. Einstein não gostava desta perspectiva, afirmando que era uma mistura irrealista.

‘Eu, pelo menos, estou convencido de que Ele [Deus] não joga aos dados.’

Albert Einstein, 1926

Partículas paradoxais Em 1935, Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen resumiram o seu desconforto sob a forma de um paradoxo. Ficou conhecido como o paradoxo Einstein-Podolsky-Rosen, ou EPR. Imaginem uma partícula que decai em duas mais pequenas. Se a partícula-mãe original estivesse estacionária, as partículas-filhas teriam de ter momento linear e momento

Cronologia

1927 D.C.

A interpretação de Copenhaga é proposta

1935

Einstein, Podolsky e Rosen apresentam o seu paradoxo

Teletransporte

Na ficção científica, o teletransporte é usado imensas vezes. Os começos das tecnologias de comunicação, como o telégrafo no século XIX, levantaram a possibilidade de talvez se poder transferir outra informação que não fosse apenas impulsos eléctricos ao longo de grandes distâncias. Nos anos 1920 e 1930, o teletransporte começou a aparecer em livros, por exemplo de Arthur Conan Doyle, e tornou-se comum na ficção científica. No livro *A Mosca*, de George Langelaan (adaptado três vezes ao cinema), um cientista teletransporta-se a si mesmo mas a informação correspondente ao seu corpo é misturada com a de uma mosca doméstica, o que o transforma numa

quimera, parte humano parte mosca. O teletransporte realmente tornou-se popular com a série de TV de culto *Star Trek*, que incluía a famosa frase «Beam me up, Scotty». O teletransporte da nave espacial Enterprise desmantelava a pessoa a ser transmitida átomo por átomo e recompunha-a de forma perfeita. Na vida real, julgava-se que o teletransporte seria impossível devido ao princípio da incerteza de Heisenberg. Embora seja de facto impossível transmitir átomos verdadeiros, o entrelaçamento quântico possibilita a transmissão a longa distância de informação, mas até agora isto só resultou para partículas minúsculas.

angular iguais em valor mas com sentidos opostos, de tal forma que a sua soma fosse zero (visto que são grandezas conservadas). Logo, as partículas emergentes têm de sair disparadas em sentidos opostos. Outras grandezas quânticas do par estarão interligadas de forma similar. Uma vez emitidas, se medíssemos a direcção do *spin* de uma das partículas, ficaríamos imediatamente a saber que o outro membro do par teria um *spin* oposto – mesmo que já tivesse passado um intervalo de tempo considerável, e a outra partícula estivesse muito longe. É como olhar para uma gêmea idêntica e notar a cor dos olhos dela. Se forem verdes, ficamos nesse preciso momento a saber que a outra gêmea também tem olhos verdes.

Se tentassem explicar isto usando a interpretação de Copenhaga, diriam que, antes de qualquer medição, as duas partículas (ou gêmeas) existiam como uma sobreposição de ambos os estados possíveis. As funções de onda das partículas incluiriam toda a informação acerca de elas

1964

John Bell deduz desigualdades para uma realidade local

1981–2

É mostrado que as desigualdades de Bell são violadas, o que apoia a ideia de entrelaçamento

1993

Os *bits* quânticos são baptizados de *qubits*

estarem a girar em ambas as direcções; as gémeas tinham uma mistura de todas as cores de olhos possíveis. Quando medimos um dos membros do par, as funções de onda de ambos têm de colapsar ao mesmo tempo. Einstein, Podolsky e Rosen achavam que isto não fazia sentido. Como seria possível que vocês afectassem instantaneamente uma partícula que poderia estar muitíssimo longe da sua companheira? Einstein já tinha mostrado que a velocidade da luz era um limite de velocidade universal – nada pode andar mais depressa do que a luz. Como é que o facto de se ter observado uma das partículas era comunicado à outra? Que uma medição num dos extremos do universo pudesse afectar «simultaneamente» matéria no extremo oposto deveria significar que a mecânica quântica estava errada.

Entrelaçamento No mesmo artigo em que descreveu o seu paradoxo do gato, Schrödinger usou a palavra «entrelaçamento» para descrever esta acção à distância esquisita.

Para Bohr, era inevitável que o universo estivesse ligado entre si ao nível quântico. Mas Einstein preferia acreditar numa «realidade local», em que se podia confiar no conhecimento acerca do mundo num dado local. Da mesma forma que, em princípio, as gémeas teriam nascido com a mesma cor de olhos, e não andavam por aí num estado difuso de olhos multicoloridos até nós as observarmos, Einstein acreditava que o par de partículas era emitido de uma certa maneira, que estava fixa daí em diante; não haveria necessidade de nenhuma comunicação à distância, ou de nenhum papel para o observador. Einstein acreditava que algum tipo de «variáveis escondidas», hoje em dia reformuladas como «desigualdades de Bell», viriam a ser descobertas e acabariam por provar que ele estava correcto.

A ideia de realidade local de Einstein veio a revelar-se falsa. Já se fizeram experiências que demonstraram que o entrelaçamento quântico é verdadeiro, mesmo quando existem mais do que duas partículas no sistema, e mesmo quando as partículas entrelaçadas estão separadas por muitos quilómetros.

Informação quântica O entrelaçamento quântico começou por ser um debate filosófico, mas hoje permite-nos uma forma de codificar e transmitir informação completamente diferente daquilo que até há pouco acreditávamos ser possível. Em computadores normais, a informação está codificada sob a forma de bits, com valores fixos num código binário. Na codificação quântica usam-se dois ou mais estados quânticos, mas o sistema também pode existir como uma mistura desses estados. Em 1993, inventou-se o termo «qubit» para abreviar um bit quântico (as misturas quânticas de valores de bits), e hoje em dia há computadores quânticos a serem concebidos com base nestes princípios.

Os estados entrelaçados dão-nos um novo tipo de elos de comunicação entre os qubits. Se ocorre uma medição, ela desencadeia uma cascata de comunicações quânticas adicionais entre

os elementos dos sistema. A medida de um dos elementos fixa os valores de todos os outros; tais efeitos são muito úteis em criptografia quântica, e até no teletransporte quântico.

Na verdade, a indeterminação da mecânica quântica exclui por completo o tipo de teletransporte que vemos na maior parte da ficção científica, onde um cientista extrai toda a informação de uma coisa e torna a reuni-la noutra local. Não é possível obter toda a informação, devido ao princípio da incerteza. De forma que teletransportar um ser humano, ou mesmo uma mosca, é impossível. No entanto, é possível uma versão quântica disto, manipulando sistemas entrelaçados. Se duas pessoas, muitas vezes baptizadas Alice e Bob pelos físicos, partilharem um par de fótons entrelaçados, a Alice pode fazer medições sobre o seu fóton de forma a transferir toda a informação original ao fóton entrelaçado do Bob. O fóton do Bob torna-se indistinguível do original dela, embora não seja uma reprodução dele. Se isto é ou não teletransporte, é uma boa pergunta. Não houve fótons nenhuns nem nenhuma informação a viajar de um sítio para o outro, de forma que a Alice e o Bob poderiam estar em lados opostos do universo e mesmo assim conseguirem transformar os seus fótons entrelaçados.

“Parece que até Deus está limitado pelo princípio da incerteza, e não pode saber quer a posição quer a velocidade de uma partícula. Então será que Deus joga aos dados com o universo? Todas as evidências apontam para que ele seja um jogador inveterado.”

Stephen Hawking, 1993

A criptografia quântica baseia-se na utilização do entrelaçamento quântico como chave de encriptamento. O emissor e o receptor têm, cada um, de possuir os componentes de um sistema entrelaçado. Pode baralhar-se aleatoriamente uma mensagem, e o único código que será capaz de tornar a ordenar a mensagem é enviado através de ligações de entrelaçamento quântico para o receptor. Isto tem a vantagem de que se a mensagem for interceptada quaisquer medições arruinam-na (alterando o seu estado quântico), de forma que o processo só pode ser usado uma vez, e a transmissão só pode ser lida por alguém que saiba exactamente quais as medições quânticas que devem ser efectuadas para revelar o conteúdo, através da chave.

O entrelaçamento diz que é errado assumir que o mundo existe independentemente numa forma única, sem ser afectado pelas medições que se fazem dele. Não existe nenhum objecto que esteja fixo no espaço, apenas existe informação. Só podemos recolher informação acerca do nosso mundo e ordená-la de forma que ele faça sentido para nós.

a ideia resumida

Mensagens instantâneas

30 O princípio de exclusão de Pauli

O princípio de exclusão de Pauli explica porque é que a matéria é rígida e impermeável – porque é que nós não nos enfiámos pelo chão abaixo ou passamos com a mão através de uma mesa. É também responsável pela existência de estrelas de neutrões e anãs brancas. As regras de Wolfgang Pauli aplicam-se aos electrões, protões e neutrões, afectando assim toda a matéria. O princípio declara que nenhuma dessas partículas pode ter simultaneamente o mesmo conjunto de números quânticos.

O que é que dá rigidez à matéria? Já que os átomos são essencialmente feitos de espaço vazio, porque é que não conseguimos espremer-nos pelo meio deles como uma esponja, e porque é que não conseguimos empurrar materiais uns através dos outros, como se estivéssemos a ralar queijo? Saber o porquê de a matéria habitar o espaço é uma das questões mais profundas da física. Se não fosse verdade, poderíamos cair até ao centro da Terra ou afundarmo-nos no chão, e os edifícios esmagar-se-iam devido ao próprio peso.

Não iguais O princípio de exclusão de Pauli, concebido por Wolfgang Pauli em 1925, explica porque é que os átomos normais não podem coexistir na mesma região do espaço. Pauli sugeriu que o comportamento quântico dos átomos e das partículas implicava que eles tivessem de seguir certas regras que os proibiam de possuir a mesma função de onda ou, de

Cronologia

1925 D.C.

Pauli propõe o seu princípio da exclusão

1933

O neutrão é descoberto e as estrelas de neutrões propostas

forma equivalente, as mesmas propriedades quânticas. Pauli estabeleceu o seu princípio para tentar explicar o comportamento dos electrões nos átomos. Sabia-se que os electrões preferiam certos estados de energia, também chamados camadas, em torno do núcleo. Mas os electrões espalhavam-se por essas camadas e nunca se juntavam todos na camada de energia mais baixa. Pareciam povoar as camadas de acordo com as regras que Pauli tinha descoberto.

Tal como a física de Newton se exprime em termos de forças, momento e energia, a mecânica quântica tem o seu conjunto de parâmetros próprio. O *spin* quântico é análogo ao momento angular, por exemplo, mas está quantificado e só pode tomar certos valores. Ao resolver a equação de Schrödinger, precisamos de quatro números quânticos para descrever uma partícula qualquer – três coordenadas espaciais e uma quarta, que é o *spin*. As regras de Pauli afirmavam que dois electrões num átomo não poderiam ter os mesmos quatro números quânticos. Ou seja, não pode haver dois electrões que estejam no mesmo sítio com as mesmas propriedades ao mesmo tempo. Logo, à medida que o número de electrões num átomo aumenta, por exemplo quando os átomos se tornam mais pesados, os electrões vão preenchendo as vagas que lhes estão reservadas e vão gradualmente passando a camadas cada vez mais elevadas. É como os assentos num teatro pequeno a encherem-se, começando junto ao palco e espalhando-se mais para trás.

Fermiões As regras de Pauli aplicam-se a todos os electrões e a outras partículas cujo *spin* quântico tenha valores que sejam múltiplos semi-inteiros da unidade básica de *spin*, como por exemplo o protão e o neutrão. Chamamos «fermiões» a estas partículas, devido ao físico Italiano Enrico Fermi. Os fermiões têm funções de onda assimétricas, mudando do positivo para o negativo, como expresso na equação de Schrödinger. O *spin* também tem um sentido, de forma que é possível dois fermiões estarem um ao pé do outro se possuírem *spins* opostos. Dois electrões podem ambos ocupar o estado de energia mais baixo de um átomo, mas só se os seus *spins* estiverem desalinhados.

Como os blocos de construção básicos da matéria – electrões, protões e neutrões – são todos fermiões, o princípio de exclusão de Pauli governa o comportamento dos átomos. Como nenhuma destas partículas pode partilhar o seu estado quântico de energia com outra, os átomos são inerentemente rígidos. Os electrões que se distribuem por entre muitas camadas de energia não podem ser comprimidos para ficarem todos a ocupar a camada mais próxima do

WOLFGANG PAULI 1900–59

Wolfgang Pauli é conhecido sobretudo pelo seu princípio da exclusão e por ter proposto a existência do neutrino. Pauli foi um estudante precoce na Áustria, tendo já enquanto jovem lido os trabalhos de Einstein e escrito artigos de relatividade. Heisenberg descreveu Pauli como um noctívago que trabalhava em cafés e que raramente assistia a aulas de manhã. Pauli teve muitos problemas pessoais, incluindo o suicídio da sua mãe, um casamento de curta duração e um problema com a bebida. Vendo que precisava de ajuda, recorreu ao

psicólogo suíço Carl Jung, que registou milhares de sonhos de Pauli. A vida de Pauli melhorou muito quando voltou a casar, mas então deu-se a Segunda Guerra Mundial. Ele trabalhou imenso para tentar manter viva a ciência europeia a partir dos Estados Unidos. Retornou a Zurique depois da guerra, e foi-lhe atribuído o Prémio Nobel em 1945. Nos seus últimos anos, dedicou-se aos aspectos mais filosóficos da mecânica quântica e aos seus paralelos com a psicologia.

núcleo; na realidade, resistem a esta compressão exercendo uma pressão muito grande. Logo, não se consegue obrigar um par de fermiões a sentar-se no mesmo lugar no teatro.

Esmagamento quântico As estrelas de neutrões e as anãs brancas devem as suas existências ao princípio da exclusão de Pauli. Quando uma estrela atinge o fim da sua vida e já não consegue queimar combustível, ela implode. É a sua própria gravidade gigantesca que puxa as camadas de gás para dentro. À medida que a estrela colapsa, algum desse gás pode ser expulso para longe (como sucede numa explosão de supernova), mas as cinzas que restam vão-se contrair ainda mais. Enquanto os átomos vão sendo esmagados uns contra os outros, os electrões tentam resistir à compactificação. Eles ocupam as camadas mais exteriores dos átomos que conseguem sem violar o princípio de Pauli, e aguentam a estrela, parando a compressão graças apenas a esta «pressão de degenerescência». As anãs brancas são estrelas com mais ou menos a massa do Sol, comprimidas até ocuparem um volume de raio similar ao da Terra. São tão densas que um cubo de açúcar de matéria de uma anã branca pode chegar a pesar uma tonelada.

Para estrelas com uma auto-gravidade maior, em especial estrelas com massa superior a 1,4 vezes a massa do Sol (a que se chama o limite de



Terra



Anã branca



Estrela de neutrões

“A questão, de porque é que todos os electrões de um átomo no seu estado fundamental não estavam contidos na camada mais interna, já tinha sido enfatizada por Bohr como sendo um problema fundamental... não se podia dar nenhuma explicação deste fenómeno com base na mecânica clássica.”

Wolfgang Pauli, 1945

Chandrasekhar), a compactificação não pára por aqui. Dá-se um segundo processo, em que os protões e electrões são esmagados uns contra os outros e formam neutrões, de forma que a estrela gigante reduz-se a uma bola de neutrões muito compacta.

Tal como antes, como os neutrões são fermiões, eles não podem ter todos o mesmo estado quântico. Mais uma vez, é a pressão de degenerescência que aguenta a estrela, mas ela agora fica confinada a um raio de mais ou menos dez quilómetros, tendo toda a massa do Sol, ou de vários sóis, sido esmagada até ocupar uma região com o comprimento de Manhattan. As estrelas de neutrões são tão densas que um pedaço do tamanho de um cubo de açúcar pesaria mais do que cem milhões de toneladas. E no caso da gravidade da estrela ser ainda maior, como sucede para estrelas ainda mais pesadas, a compactificação não pára e acaba por produzir um buraco negro.

Bosões As regras de Pauli só se aplicam aos fermiões. As partículas com múltiplos inteiros da unidade básica de *spin*, que têm funções de onda simétricas, são chamadas «bosões», devido ao físico indiano Satyendranath Bose. Os bosões incluem as partículas associadas às forças fundamentais, como os fotões, e alguns núcleos simétricos, como o de hélio (que contém dois protões e dois neutrões). Não há limite para o número de bosões que pode ocupar o mesmo estado quântico, e isto pode levar a comportamentos coordenados de grupos de partículas. Um exemplo disto é o laser, em que muitos fotões de uma única cor actuam em conjunto.

Sendo originalmente uma extensão da concepção de Bohr do átomo, o princípio da exclusão de Pauli surgiu mesmo antes dos avanços principais da teoria quântica, empreendidos por Heisenberg e Schrödinger. Mas é fundamental para o estudo do mundo atómico e, ao contrário da maior parte da mecânica quântica, tem consequências em que até podemos tocar.

a ideia resumida
Este lugar está ocupado?

31 Supercondutividade

A temperaturas muito baixas, alguns metais e ligas conduzem electricidade sem resistência nenhuma. Nestes supercondutores, a corrente pode fluir durante milhares de milhões de anos sem que se perca qualquer energia. Como os electrões se acoplam uns aos outros e se movem como um todo, evitando desta forma as colisões que provocam a resistência eléctrica, aproximam-se de um estado de movimento perpétuo.

Quando se arrefece mercúrio até ele chegar a uns poucos graus acima do zero absoluto, o metal passa a conduzir electricidade sem qualquer resistência. Isto foi descoberto em 1911 pelo físico holandês Heike Onnes, quando ele deitou mercúrio líquido para dentro de hélio líquido, à temperatura de 4,2 K (graus acima de zero). Tinha-se descoberto o primeiro material supercondutor, sem resistência à corrente. Pouco tempo depois, observou-se um comportamento parecido noutros metais frios, incluindo o chumbo e compostos como o nitreto de nióbio. A resistência eléctrica desaparecia por completo abaixo de uma temperatura crítica, que variava de material para material.

Movimento perpétuo Uma das consequências da resistência zero é que uma corrente que se ponha a passar num supercondutor pode fluir para sempre. Já se conseguiram manter correntes em laboratório durante muitos anos, e os físicos estimam que uma tal corrente poderia durar milhares de milhões de anos antes de começar a perder energia. É o mais próximo que os cientistas chegaram do movimento perpétuo.

Cronologia

1911 D.C.

Onnes descobre a supercondutividade

1925

São previstos os condensados de Bose-Einstein

1933

É demonstrado que os supercondutores repelem campos magnéticos

Anos 1940

São descobertos compostos supercondutores

Superfluidez

Os superfluidos são fluidos que não têm nenhuma viscosidade, de forma que podem escorrer ao longo de um tubo para sempre, sem qualquer tipo de fricção. A superfluidez é conhecida desde os anos 1930. Um exemplo é o hélio-4 (massa atômica 4, feito de dois prótons, dois neutrões e dois electrões) superarrefecido. Os átomos de hélio-4 são bosões, compostos por pares de fermiões.

Os superfluidos comportam-se de uma forma estranhíssima quando os colocamos num recipiente qualquer – podem escorrer, numa camada com um átomo de espessura, e transbordar espontaneamente pelas bordas do recipiente. É possível criar uma fonte,

basta inserir um tubo capilar num superfluido e aquecê-lo, porque o superfluido não consegue aguentar um gradiente de temperatura (visto que tem condutividade térmica infinita) e o calor provoca imediatamente uma mudança de pressão. Se vocês tentassem rodar um balde cheio de um superfluido, ia acontecer uma coisa bizarra. Como não há viscosidade, o fluido não começaria imediatamente a rodar, ficando imóvel. Se rodassem o balde ainda mais depressa, a uma dada velocidade crítica o superfluido começaria a girar de repente. A sua velocidade está quantificada – o superfluido só roda para certos valores.

Pensamento em grupo Os físicos não percebiam como é que uma transição tão drástica poderia ocorrer a temperaturas baixas. A temperatura crítica sugeria uma transição de fase rápida, e por isso os físicos começaram a olhar para o comportamento quântico dos electrões nos metais. A mecânica quântica deu algumas pistas, e nos anos 1950 começaram a ser propostas algumas ideias. Em 1957, os físicos americanos John Bardeen, Leon Cooper e John Schrieffer criaram uma explicação convincente e completa para a supercondutividade nos metais e em ligas simples, a que hoje chamamos a teoria BCS. Esta teoria sugeria que a supercondutividade ocorre devido ao comportamento bizarro que os electrões têm quando estão ligados aos pares.

1957

É proposta a teoria BCS para a supercondutividade

1986

São criados supercondutores a temperaturas elevadas

1995

Condensados de Bose-Einstein são feitos em laboratório

condensados de Bose-Einstein

A temperaturas ultrafrias, os grupos de bósons podem comportar-se de formas muito estranhas. Próximo do zero absoluto, muitos bósons podem coabitar todos no mesmo estado quântico, fazendo com que o comportamento quântico bizarro seja visível a escalas grandes. Previstos inicialmente por Albert Einstein em 1925, e baseados em ideias do físico indiano Satyendranath Bose,

estes sistemas, chamados condensados de Bose-Einstein (na sigla inglesa, BECs), só foram criados em laboratório, em 1995. Eric Cornell e Carl Wieman da Universidade do Colorado, e um pouco depois Wolfgang Ketterle do M.I.T., observaram este comportamento num gás de átomos de rubídio, arrefecidos até uma temperatura de 1,7 décimas de milionésimos de Kelvin.

Os pares de electrões, chamados pares de Cooper, interagem com a rede de átomos de metal através de vibrações que os ligam entre si. Um metal é uma rede de núcleos carregados positivamente, na qual há um «mar» de electrões a flutuar livremente. Quando o metal está muito frio, e a rede está imóvel, um electrão carregado negativamente atrai um bocadinho os pontos positivos da rede e puxa-os todos, deixando atrás de si uma espécie de rasto em forma de onda. Um outro electrão que esteja a passar pelas redondezas pode ser atraído para esta região com uma carga positiva ligeiramente mais intensa, e os dois electrões ficam acoplados um ao outro. O segundo segue o primeiro. Isto sucede para electrões ao longo de todo o metal, e dá-se que muitos pares de electrões sincronizados ligam-se entre si, formando um padrão ondulatório em movimento.

Um electrão sozinho tem de obedecer ao princípio da exclusão de Pauli, que proíbe que as partículas com funções de onda assimétricas (fermiões) partilhem o mesmo estado quântico. Portanto, onde houverem muitos electrões, se eles estiverem na mesma região terão de ter energias diferentes entre si. É isto que geralmente acontece num átomo ou num metal. Mas quando os electrões estão emparelhados e se comportam como uma partícula individual, eles já não seguem este comportamento. A função de onda global torna-se simétrica e os electrões juntos já não são fermiões, mas sim bósons. E como bósons, os pares de electrões podem partilhar a mesma energia mínima. Isto tem como consequência que o conjunto dos pares tem uma energia ligeiramente mais baixa do que os electrões livres teriam no metal. É esta diferença de energia específica que dá origem à rápida transição de propriedades que ocorre na temperatura crítica.

Quando a energia de calor da rede é menor do que esta queda de energia, observamos um fluxo regular de pares de electrões acoplados às vibrações da rede, e é isso a supercondutividade. Como as ondas da rede impelem um movimento ao longo de grandes distâncias na rede, não existe resistência – todos os pares de electrões se estão a movimentar uns em relação aos outros. Ao evitarem quaisquer colisões com os átomos imóveis da rede, os pares de electrões actuam como um superfluido, capaz de fluir sem qualquer impedimento. A temperaturas superiores, os pares de Cooper desagregam-se e perdem as suas propriedades bosónicas. Os electrões passam a poder colidir com os iões da rede, que agora estão quentes e a vibrar, e isso cria uma resistência eléctrica. A transição rápida alterna entre os estados quando os electrões passam de um fluxo de bosões coordenado para fermiões erráticos, ou vice-versa.

Supercondutores quentes Nos anos 1980, a tecnologia dos supercondutores levantou voo. Em 1986, investigadores suíços descobriram um novo tipo de materiais cerâmicos que se tornavam supercondutores a temperaturas relativamente quentes – os chamados «supercondutores a altas temperaturas». O primeiro composto que criaram, uma combinação de lantânio, bário, cobre e oxigénio (conhecido como óxidos de cobre ou cupratos) passava a ter comportamento supercondutor a 30 Kelvins. Um ano mais tarde, outros investigadores criaram um material que se tornava supercondutor a temperaturas de cerca de 90 Kelvins, mais quente do que o azoto líquido, que é o arrefecedor mais usado. Utilizando cerâmicas à base de perovskita e cupratos mercúricos (dopados com tálio), já se conseguiram atingir temperaturas de supercondutividade de cerca de 140 Kelvins, e são possíveis temperaturas ainda maiores a pressões elevadas.

Essas cerâmicas deviam ser isolantes, pelo que isto foi uma descoberta inesperada. Os físicos ainda estão a tentar construir uma teoria que consiga explicar a supercondutividade de alta temperatura. Mesmo assim, o desenvolvimento destes supercondutores tornou-se num campo da física em evolução rápida, e poderá revolucionar a electrónica.

Para que é que se usam supercondutores? Eles são muito úteis para construir electroímãs poderosos, como os que são usados nos exames de MRI nos hospitais e em aceleradores de partículas. Um dia poderão vir a ser usados para se fazerem transformadores mais eficientes, ou até para comboios de levitação magnética. Mas como actualmente eles só funcionam a temperaturas ultra-baixas, as suas aplicações são um pouco limitadas. Daí tanto empenho na procura por supercondutores de temperatura elevada, que possam ter aplicações dramaticamente importantes.

a ideia resumida
A resistência é fútil

32 O átomo de Rutherford

Os átomos não são os blocos de construção da matéria mais pequenos de todos, como se pensava. No início do século XX, físicos como Ernest Rutherford conseguiram penetrá-los, revelando em primeiro lugar camadas de electrões e depois um centro duro, ou núcleo, feito de prótons e de neutrões. Para que o núcleo ficasse intacto foi preciso inventar uma nova força fundamental – a força nuclear forte. Tinha começado a era atómica.

A ideia da matéria ser feita de enxames de átomos minúsculos já existe desde o tempo dos gregos. Mas enquanto os gregos acreditavam que o átomo era a componente indivisível mais pequena da matéria, os físicos do século XX deram-se conta de que isso não era verdade, e começaram a sondar a estrutura interna dos próprios átomos.

O modelo do bolo de passas A primeira camada a ser tratada foi a dos electrões. Em 1887, Joseph John Thomson conseguiu libertar electrões de átomos, ao fazer passar uma corrente eléctrica através do gás contido num tubo de vidro. Em 1904, Thomson propôs o «modelo do bolo de passas» para o átomo, em que os electrões carregados negativamente estavam espalhados, como passas ou ameixas, no meio de uma massa esponjosa de carga positiva. Hoje chamar-lhe-famos o modelo do Blueberry Muffin. O modelo de Thomson era essencialmente uma nuvem de carga positiva contendo electrões, que se conseguiam libertar com relativa facilidade. Quer os electrões quer as cargas positivas podiam misturar-se entre si no meio do «bolo».

Cronologia

1887 D.C.

Thomson descobre o electrão

1904

Thomson propõe o modelo do bolo de passas

1909

Rutherford efectua a sua experiência com folhas de ouro

ERNEST RUTHERFORD 1871–1937

Rutherford, originário da Nova Zelândia, foi um alquimista dos tempos modernos, transmutando um elemento, o azoto, noutro, o oxigénio, através da radioactividade. Era um líder inspirador no Laboratório Cavendish em Cambridge, tendo servido de mentor a imensos futuros

vencedores do Prémio Nobel. Deram-lhe a alcunha de «o crocodilo», e até hoje o símbolo do laboratório é esse animal. Em 1910, as suas investigações acerca da dispersão de raios alfa e da natureza da estrutura interna do átomo levaram-no a identificar o núcleo.

O núcleo Não muito depois, em 1909, Ernest Rutherford estava intrigado com os resultados de uma experiência que tinha feito, em que partículas alfa pesadas tinham sido disparadas contra uma folha de ouro muito fina, fina o suficiente para a maior parte das partículas terem passado através dela. Para espanto de Rutherford, uma pequena fracção das partículas tinha feito ricochete contra a folha, voltando para trás, em sua direcção. As partículas tinham invertido a sua direcção de 180 graus, como se tivessem chocado contra uma parede de tijolos. Ele deu-se conta de que os átomos de ouro que compunham a folha tinham dentro de si alguma coisa dura e maciça o suficiente para repelirem as partículas alfa pesadas.

Rutherford deu-se conta de que o modelo de Thomson do bolo de passas não poderia explicar esta experiência. Se um átomo fosse só uma pasta de partículas carregadas positiva e negativamente misturadas, nenhuma delas seria pesada o suficiente para dar um tal empurrão à partícula alfa, bem maior. Então, pensou ele, os átomos de ouro devem ter um centro denso, a que se chama «núcleo», derivado da palavra latina para o «caroço» de uma noz. Começou assim o campo da física nuclear, a física do núcleo atómico.

“Era quase tão in-creditável quanto se tivesse atirado um obus de 15 polegadas contra um lenço de papel e o projectil ter voltado para trás contra si.”

Ernest Rutherford, 1936

Isótopos Os físicos já sabiam como calcular as massas dos diferentes elementos da tabela periódica, e portanto conheciam os pesos relativos dos átomos. Mas era mais difícil perceber

1911

Rutherford propõe o modelo nuclear

1918

Rutherford isola o próton

1932

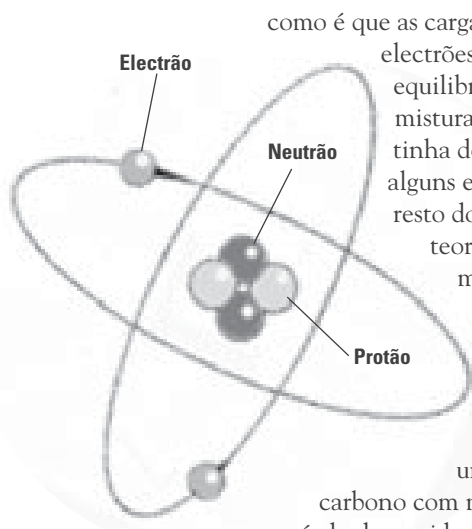
Chadwick descobre o neutrão

1934

Yukawa propõe a força nuclear forte

Três de cada vez

As substâncias radioactivas emitem três tipos de radiação, chamados radiação alfa, beta e gama. A radiação alfa consiste em núcleos pesados de hélio, com dois protões e dois neutrões muito ligados entre si. Como as partículas alfa são pesadas, elas não precisam de andar muito para perderem a sua energia em colisões, e por isso é fácil pará-las, mesmo só com uma folha de papel. As partículas beta são um segundo tipo de radiação; estas partículas são electrões de alta velocidade – muito leves e com carga negativa. As partículas beta conseguem percorrer distâncias maiores do que a radiação alfa, mas podem ser bloqueadas por metais, como por exemplo uma placa de alumínio. Em terceiro lugar temos os raios gama, que são ondas electromagnéticas associadas a fotões, e que por isso não têm massa nenhuma mas levam imensa energia. Os raios gama são muito penetrantes e só podem ser bloqueados por blocos densos de cimento ou de chumbo. Os três tipos de radiação são todos emitidos por átomos instáveis, que descrevemos como sendo radioactivos.



como é que as cargas estavam distribuídas. Como Rutherford só conhecia electrões e núcleos carregados positivamente, ele tentou equilibrar as cargas assumindo que o núcleo era feito de uma mistura de protões (partículas carregadas positivamente que ele tinha descoberto em 1918 ao isolar o núcleo do hidrogénio) e alguns electrões, que neutralizavam parcialmente a carga. O resto dos electrões girava em torno do núcleo nas orbitais da teoria quântica bem familiares. O hidrogénio, o elemento mais leve, tem um núcleo que só contém um protão com um electrão em órbita em torno dele.

Já se conheciam outras formas de elementos, com pesos esquisitos, a que se chamavam isótopos. Por exemplo, o carbono tem regra geral uma massa de 12 unidades atómicas, mas de vez em quando observa-se carbono com massa de 14 unidades. O carbono-14 é instável e tem um período de semidesintegração (ou seja, o tempo que metade dos átomos leva para decair, emitindo uma partícula radioactiva) igual a 5730 anos, emitindo uma partícula beta e transformando-se em azoto-14. Esta reacção é utilizada na datação por carbono radioactivo para medir a idade de artefactos arqueológicos com milhares de anos, por exemplo, madeira ou carvão queimado em fogos.

Neutrões Nos anos 1930 descobriu-se um novo tipo de «radiação», pesada o suficiente para libertar protões de parafina, mas não tendo carga. James Chadwick mostrou que esta nova radiação era de facto uma partícula neutra com a mesma massa que o protão. Foi baptizada de neutrão e o modelo do átomo foi rearranjado. Os cientistas deram-se conta de que um átomo de carbono-12, por exemplo, tem 6 protões e 6 neutrões no seu núcleo e 6 electrões em órbita. Chamamos nucleões aos neutrões e protões.

‘Nada existe a não ser átomos e espaço vazio: tudo o resto é opinião.’

Demócrito, 460–370 A.C.

A força forte O núcleo é perfeitamente minúsculo quando comparado com o tamanho total de um átomo, e dos seus electrões circundantes. Sendo cem mil vezes mais pequeno do que um átomo, o núcleo mede só uns poucos fentómetros (10^{-15} metros, ou seja, um milésimo de bilionésimo de metro). Se um átomo fosse ampliado até ter o diâmetro da Terra, o núcleo no centro teria um tamanho essencialmente igual a 10 quilómetros, que é como quem diz o comprimento de Manhattan. Praticamente toda a massa do átomo está concentrada no núcleo, numa região minúscula, e isso pode incluir dezenas de protões. O que é que faz com que toda esta carga positiva fique junta num espaço tão pequeno, e tão fortemente ligada? Para vencer a repulsão electrostática das cargas positivas e permitir a coesão do núcleo, os físicos tiveram de inventar um novo tipo de força, chamada a força nuclear forte.

Se se aproximarem dois protões um do outro, eles inicialmente repelem-se por terem cargas iguais. Mas se os formos a aproximarem-se ainda mais, a força nuclear forte vai uni-los um ao outro. A força forte só surge para distâncias muito pequenas, mas é muito mais intensa do que a força electrostática. Se empurrarmos ainda mais os protões uns contra os outros, eles começam a resistir, comportando-se como se fossem esferas rígidas – e por isso há um limite claro para a proximidade entre si. Esta característica implica que o núcleo esteja muito fortemente ligado, seja muito compacto e imensamente rígido.

Em 1934, Hideki Yukawa propôs que a força nuclear era carregada por partículas especiais (chamadas mesões), que actuavam de forma similar aos fotões. Protões e neutrões estão «colados» uns aos outros devido a trocas de mesões. Mesmo hoje em dia, continua a ser um mistério porque é que a força nuclear forte actua a uma escala de distâncias tão específica – porque é tão fraca fora do núcleo e tão forte a curto alcance. É como se ela imobilizasse os nucleões a distâncias precisas. A força nuclear forte é uma das quatro forças fundamentais, juntamente com a gravidade, o electromagnetismo e outra força nuclear chamada a força fraca.

a ideia resumida
O núcleo duro

33 Antimatéria

Na ficção científica há muitas naves que funcionam com «motores de antimatéria», mas a antimatéria existe mesmo e já foi feita artificialmente na Terra. É uma imagem ao espelho da matéria com energia negativa, e não pode coexistir com a matéria durante muito tempo – ambas aniquilam-se numa explosão de energia quando entram em contacto. A própria existência da antimatéria sugere simetrias fundamentais na física de partículas.

Imaginem que estão a andar na rua e encontram uma réplica vossa. É o vosso gémeo de antimatéria. Apertam-lhe a mão? A antimatéria foi

“Para cada bilião de partículas de antimatéria havia um bilião e uma partículas de matéria. E quando a aniquilação mútua terminou, só restou um bilionésimo – e é isso o nosso universo actual.”

Albert Einstein, 1879–1955

prevista nos anos 1920 e descoberta nos anos 1930, ao juntar a teoria quântica e a relatividade. É uma imagem ao espelho da matéria, em que as cargas, energias e outros números quânticos das partículas trocam de sinal. De forma que um anti-electrão, a que se chama positrão, tem a mesma massa que um electrão mas, ao contrário dele, tem carga positiva. Da mesma maneira, os protões e outras partículas têm gémeos opostos de antimatéria.

Energia negativa Ao criar uma equação para o electrão em 1928, o físico britânico Paul Dirac viu que ela oferecia a possibilidade de os electrões terem energia negativa, e também energia positiva. Tal como a equação $x^2=4$ tem as soluções $x=2$ e $x=-2$, Dirac tinha duas formas de resolver o seu problema: a solução com energia positiva já era esperada, estando associada a um electrão normal, mas a energia negativa não fazia sentido. Mas em vez de ignorar este termo

Cronologia

1928 D.C.

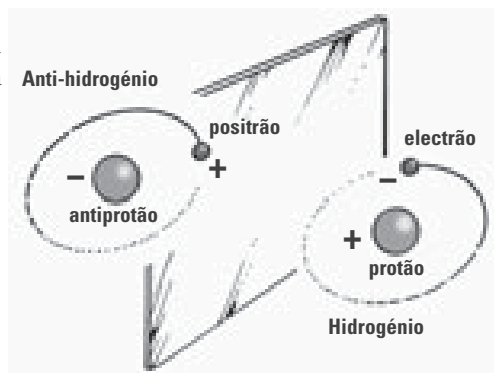
Dirac deduz a existência de antimatéria

1932

Anderson detecta o positrão

confuso, Dirac sugeriu que essas partículas poderiam de facto existir. Este estado complementar à matéria é a «anti»-matéria.

Antipartículas A caça à antimatéria começou de imediato. Em 1932, Carl Anderson confirmou experimentalmente a existência de pósitrons. Ele estava a estudar as trajetórias dos chuviros de partículas que são produzidos pelos raios cósmicos (partículas energéticas que chocam com a atmosfera vindas do espaço). E notou que uma das trajetórias correspondia a uma partícula carregada positivamente com a massa do electrão, o pósitron. E assim a antimatéria deixou nesse momento de ser apenas uma ideia abstracta e passou a ser real.



Passaram-se outras duas décadas até a próxima antipartícula, o antipróton, ser detectada. Os físicos construíram novas máquinas aceleradoras de partículas que utilizavam campos magnéticos para aumentar as velocidades das partículas que circulavam no seu interior. Esses feixes poderosíssimos de prótons acelerados produziram, em 1955, energia suficiente para revelar a existência do antipróton. Pouco depois, o antineutrão também foi detectado.

Tendo já disponíveis os blocos básicos de antimatéria equivalentes, seria possível construir um anti-átomo, ou pelo menos um anti-núcleo? A resposta, demonstrada em 1965, era sim. Um anti-núcleo de hidrogénio pesado (deutério), contendo um antipróton e um antineutrão – portanto um antideutério – foi criado pelos cientistas do CERN, na Europa, e do Laboratório Nacional de Brookhaven, na América. Conseguir colar um pósitron a um antipróton para fazer um anti-átomo de hidrogénio (anti-hidrogénio) demorou um pouco mais, mas em 1995 conseguiu-se fazê-lo. Hoje em dia, os experimentalistas estão a testar se o anti-hidrogénio se comporta da mesma maneira que o hidrogénio normal.

Na Terra, os físicos conseguem criar antimatéria em aceleradores de partículas. Quando os feixes de partículas e de antipartículas se encontram, aniquilam-se mutuamente originando uma explosão de energia pura. A massa é convertida em energia de acordo com a equação de Einstein, $E=mc^2$.

1955

Antiprótons detectados

1965

É produzido o primeiro anti-núcleo

1995

São criados átomos de anti-hidrogénio

PAUL DIRAC 1902–84

Paul Dirac foi um físico britânico talentoso mas muito tímido. As pessoas brincavam com ele dizendo que o seu vocabulário consistia apenas em «Sim», «Não» e «Não sei». Ele uma vez disse: «Ensinaaram-me na escola a nunca começar uma frase sem saber como ela termina.» O que lhe faltava em loquacidade sobejava-lhe em habilidade matemática. A sua tese de doutoramento é famosa por ser impressionantemente curta e poderosa, apresentando uma nova descrição matemática

da mecânica quântica. Ele unificou parcialmente as teorias da mecânica quântica e da relatividade, mas também é recordado pelo seu espantoso trabalho acerca do monopólo magnético e por prever a antimatéria.

Ao ser-lhe atribuído o Prémio Nobel em 1933, a primeira reacção de Dirac foi recusá-lo para evitar a publicidade. Mas desistiu quando lhe disseram que iria atrair ainda mais atenção caso recusasse.

Assimetrias universais Se a antimatéria estivesse espalhada através do universo, esses períodos de aniquilação estariam sempre a ocorrer. A matéria e a antimatéria iriam gradualmente destruir-se uma à outra em pequenas explosões, até ambas desaparecerem por completo. Como não vemos isto a acontecer, não pode haver muita antimatéria por aí. De

“Em ciência tentamos dizer às pessoas, de forma tal que toda a gente o compreenda, algo que ninguém sabia antes. Mas na poesia é exactamente o oposto.”

Paul Dirac, 1902–84

facto, a matéria normal é a única forma das partículas que vemos em grandes quantidades, numa percentagem avassaladora. Por isso concluímos que no início, na criação do universo, deve ter havido um desequilíbrio tal que foi criada mais matéria normal do que o seu oposto de antimatéria.

Tal como todas as imagens ao espelho, as partículas e as suas antipartículas estão relacionadas entre si por diversos tipos de simetrias. Uma delas é o tempo. Devido à sua energia negativa, as antipartículas são

equivalentes, do ponto de vista matemático, a partículas normais a moverem-se para trás no tempo. Logo, pode pensar-se num positrão como sendo um electrão a viajar do futuro para o passado. A próxima simetria lida com cargas e outras propriedades quânticas, que são revertidas e que se chama «conjugação de carga». Uma terceira simetria diz respeito ao movimento através do espaço. Regressando ao princípio de Mach, regra geral, os movimentos não são afectados se mudarmos a direcção das coordenadas que descrevem a nossa rede espacial. Uma partícula que se esteja a mover da esquerda para a direita é igual a uma outra a mover-se da direita para a esquerda, e também não muda quer esteja a rodar no sentido dos ponteiros do relógio ou no sentido oposto. Esta simetria de «paridade» é verdadeira para a

maior parte das partículas, mas há umas quantas para as quais ela nem sempre se aplica. Os neutrinos só existem numa forma, a de neutrinos esquerdos, girando num sentido único; não existe nenhum neutrino que seja direito. O inverso é verdade para os antineutrinos, que são todos direitos. Portanto, a simetria da paridade pode por vezes ser quebrada, embora uma combinação da conjugação de carga com a paridade seja conservada, combinação essa a que chamamos simetria de carga-paridade, ou CP, para abreviar.

“O oposto de uma afirmação correcta é uma afirmação falsa. Mas o oposto de uma verdade profunda pode bem ser outra verdade profunda.”

Niels Bohr, 1885–1962

Tal como os químicos vêem que algumas moléculas preferem existir apenas numa versão, em estruturas esquerdas ou direitas, deparamo-nos com um puzzle colossal, o de perceber porque é que o universo contém sobretudo matéria, e não antimatéria. Há uma fracção minúscula – menos de 0,01% – do universo que é feita de antimatéria. Mas o universo também contém formas de energia, entre as quais muitos fotões. De forma que é possível que se tenha criado uma quantidade imensa quer de matéria quer de antimatéria no *big bang*, que se tenham aniquilado logo a seguir. Só sobejou a ponta do icebergue. Um desequilíbrio ínfimo a favor da matéria seria suficiente para explicar a sua dominância actual. Para conseguir isto, bastaria que só tivesse sobrevivido 1 em 10 000 000 000 (10^{10}) de partículas de matéria logo a seguir ao *big bang*, tendo todo o resto sido aniquilado. A matéria que sobrou foi provavelmente preservada através de uma pequena assimetria derivada da violação da simetria CP.

As partículas que talvez tenham estado envolvidas nesta assimetria são uma espécie de bosões pesados, chamados bosões X, que ainda não foram descobertos. Estas partículas pesadas decaem de uma forma um pouco assimétrica, dando origem a uma ligeira sobreprodução de matéria. Os bosões X podem também interagir com os protões e fazer com que eles decaiam, o que seriam muito más notícias para nós porque significava que toda a matéria iria eventualmente desaparecer e formar uma névoa de partículas mais leves. Mas as boas notícias são que a escala de tempo para que isto aconteça é muito grande. O facto de estarmos aqui e ainda ninguém ter visto um protão a decair significa que os protões são muitíssimo estáveis e têm de viver durante pelo menos 10^{17} – 10^{35} anos, ou milhões de biliões de biliões de anos, o que é colossalmente superior à idade do universo. Mas isto levanta a possibilidade de, se o universo se tornar realmente muito velho, até a matéria normal poder vir, um dia, a desaparecer.

a ideia resumida

Imagem ao espelho da matéria

34 Fissão nuclear

A demonstração da fissão nuclear é um dos grandes pináculos e abismos da ciência. A sua descoberta marcou um pulo colossal na nossa compreensão da física nuclear e anunciou a aurora da energia nuclear. Mas o ambiente de guerra implicou que esta nova tecnologia fosse quase imediatamente implementada sob a forma de armas nucleares, devastando as cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki, e despoletando um problema de proliferação que continua a ser difícil de resolver.

No começo do século XX o mundo interno do átomo começou a ser revelado. E o átomo, tal como uma boneca russa, tem muitas camadas externas de electrões que rodeiam um centro duro, o núcleo. No início dos anos 1930, conseguiu-se partir o próprio núcleo, mostrando que ele consistia numa mistura de protões carregados positivamente e neutrões sem carga, ambas essas partículas muito mais pesadas que os efémeros electrões, e unidas entre si pela força nuclear forte. Descobrir a cola energética do núcleo tornou-se num Santo Graal dos cientistas.

Separação A primeira tentativa bem-sucedida de partir o núcleo ocorreu em 1932. Cockroft e Walton, em Cambridge, na Inglaterra, dispararam protões muito rápidos contra metais. Os metais mudaram de composição e libertaram energia de acordo com a equação de Einstein, $E=mc^2$. Mas estas experiências precisavam que se investisse mais energia do que aquela que era libertada nelas, e por isso os físicos não acreditavam que fosse possível aplicar comercialmente este tipo de energia.

Em 1938, os cientistas alemães Otto Hahn e Fritz Strassmann dispararam neutrões contra o elemento pesado urânio, na tentativa de criar elementos ainda mais pesados. Em vez disso, aquilo que eles descobriram foi que

Cronologia

1932 D.C.

James Chadwick
descobre o neutrão

1938

A fissão atómica
é observada

elementos muito mais leves, alguns dos quais tinham pouco menos de metade da massa do urânio, tinham surgido. Era como se o núcleo se tivesse partido ao meio por ter sido bombardeado por algo com menos de um por cento da sua massa; como uma melancia a partir-se em dois quando atingida por uma cereja. Hahn escreveu uma carta descrevendo isto a Lise Meitner, a sua colega austríaca que estava exilada na Suécia, acabada de escapar à Alemanha fascista. Meitner ficou igualmente intrigada e discutiu o assunto com o seu sobrinho físico, Otto Frisch. Meitner e Frisch deram-se conta de que haveria libertação de energia se o núcleo se partisse, porque as duas metades correspondiam a uma energia global mais pequena. Ao regressar à Dinamarca, Frisch não conseguiu conter a sua excitação e mencionou a ideia que tinham tido a Niels Bohr. Ao embarcar numa viagem de barco para a América, Bohr começou imediatamente a trabalhar numa explicação, tendo transmitido as novidades ao italiano Enrico Fermi, na Universidade Columbia.

‘... gradualmente chegámos à ideia de que talvez não se devesse pensar no núcleo como tendo sido partido ao meio com um escopro, mas que, em vez disso, talvez houvesse algo de correcto na ideia de Bohr de que o núcleo era como uma gota líquida.’

Otto Frisch, 1967

Meitner e Frisch publicaram o seu trabalho antes de Bohr, introduzindo a palavra «fissão», ou «cisão», inspirados pela divisão de uma célula

Energia nuclear

As reacções em cadeia subcríticas podem ser mantidas estáveis e serem usadas em centrais nucleares. Barras de controle de boro regulam o fluxo dos neutrões através do combustível de urânio absorvendo neutrões em excesso. Além disto, é necessário um arrefecedor para reduzir o calor libertado nas reacções de fissão. O mais comum dos arrefecedores é a água, mas também podem ser usados água pressurizada, hélio gasoso e sódio líquido. Hoje em dia é a França quem lidera no uso mundial de energia nuclear, produzindo mais de 70% do total da sua energia, comparado com cerca de 20% nos EUA ou no Reino Unido.

1942

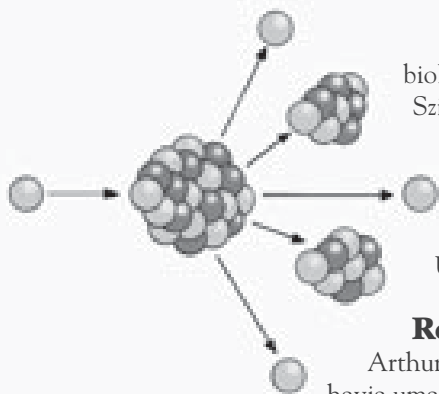
Obtém-se a primeira reacção em cadeia

1945

Bombardeamento do Japão com bombas atómicas

1951

Geração de electricidade a partir de energia nuclear



biológica. Em Nova Iorque, Fermi e o exilado húngaro Léo Szilárd descobriram que esta reacção com urânio podia produzir mais neutrões, que iriam produzir mais fissões e, por isso, poder-se-ia provocar uma reacção nuclear em cadeia (uma reacção que se sustentava a si mesma).

Fermi obteve a primeira reacção em cadeia em 1942 na Universidade de Chicago, por baixo do estádio de futebol.

Reacção em cadeia

O colega de Fermi, o físico Arthur Compton, escreveu a respeito desse dia: «No balcão havia uma dúzia de cientistas a olharem para os instrumentos e a manusearem os controles. Do outro lado da sala estava uma grande

pilha cúbica de blocos de grafite e urânio na qual esperávamos que se viesse a desenvolver a reacção em cadeia. Inseridas nas aberturas desta pilha estavam barras de controle e segurança. Depois de uns quantos testes preliminares, Fermi deu a ordem para retirar as barras de controle mais uns trinta centímetros. Sabíamos que era isso que seria o verdadeiro teste. Os contadores geiger que estavam a registar os neutrões do reactor começaram a “clicar” cada vez mais depressa, até o seu som se tornar contínuo. A reacção continuou a crescer até ao ponto em que poderia haver perigo de radiação na plataforma onde estávamos. “Empurrem as barras de segurança”, ordenou Fermi. O barulho dos contadores reduziu-se a uma série lenta de estalidos. Pela primeira vez, tinha-se libertado o poder atómico. Alguém passou a Fermi uma garrafa de vinho italiano e houve uma pequena celebração.»

O projecto Manhattan Szilárd estava tão preocupado com a possibilidade de cientistas alemães copiarem a sua proeza que abordou Albert Einstein e fizeram uma carta conjunta ao presidente Roosevelt em 1939. No entanto, não aconteceu grande coisa até chegar 1941, quando físicos no Reino Unido partilharam um cálculo que mostrava o quão

Lixo nuclear

Os reactores de fissão produzem energia de forma eficiente, mas geram lixo radioactivo. Os produtos mais tóxicos são, entre outros, os restos dos combustíveis de urânio, que podem ficar radioactivos durante milhares de anos, e elementos mais pesados (como o plutónio) que podem perdurar por centenas de milhares de anos. Estes tipos de resíduos perigosos são produzidos em pequenas quantidades, mas a extracção do urânio do seu minério natural, e outros processos de tratamento, deixam um rasto de resíduos de nível mais baixo. Como dispor destes resíduos é uma questão que está ainda a ser decidida a nível mundial.

fácil seria construir uma arma nuclear. Isso coincidiu com o ataque Japonês a Pearl Harbor, e Roosevelt começou o projecto dos EUA de uma bomba nuclear, conhecido como Projecto Manhattan. Foi liderado pelo físico de Berkeley Robert Oppenheimer, numa base secreta e isolada em Los Alamos, no Novo México.

No Verão de 1942, a equipa de Oppenheimer construiu mecanismos para a bomba. Para que a reacção em cadeia ocorresse e desencadeasse uma explosão era necessária uma massa crítica de urânio, que deveria ser dividida antes da detonação. Havia duas técnicas que tinham sido escolhidas, um mecanismo de «pistola», em que um pedaço de urânio era disparado contra outro pedaço usando explosivos condicionais completando a massa crítica, e um mecanismo de «implosão» em que explosivos condicionais faziam com que uma esfera oca de urânio implodisse para um núcleo de plutónio.

O urânio existe sob duas formas, ou isótopos, com números diferentes de neutrões nos seus núcleos. O isótopo mais comum, o urânio-238, é dez vezes mais comum do que o outro, o urânio-235. É o urânio-235 que é o mais eficaz para uma bomba de fissão, de forma que é necessário enriquecer urânio bruto para aumentar o teor de urânio-235. Quando o urânio-238 recebe um neutrão transforma-se em plutónio-239. O plutónio-239 é instável e a sua quebra produz ainda mais neutrões por grama, de forma que misturar plutónio com urânio pode desencadear a reacção em cadeia mais facilmente. O método da pistola foi utilizado com urânio enriquecido para construir o primeiro tipo de bomba, chamada *Little Boy*. A bomba do tipo de implosão esférica, incluindo plutónio, também foi construída, e chamava-se *Fat Man*.

A 6 de Agosto, *Little Boy* foi largada sobre Hiroshima. Três dias mais tarde, *Fat Man* destruiu Nagasaki. Cada uma das bombas libertou o equivalente a 20 000 toneladas de dinamite, matando 70 000-100 000 pessoas num instante, e com o passar do tempo o dobro desse número.

“Julguei que este dia seria lembrado como um dia negro na história da humanidade... Também estava consciente de que algo tinha de ser feito se os alemães conseguissem a bomba antes de nós a termos... Eles tinham as pessoas para o fazer... Não tínhamos escolha, ou pensávamos que não tínhamos escolha.”

Léo Szilárd, 1898–1964

a ideia resumida
Partindo o átomo

35 Fusão nuclear

Todos os elementos que nos rodeiam, incluindo os dos nossos corpos, são produtos da fusão nuclear. A fusão dá energia a estrelas como o Sol, dentro das quais são cozinhados todos os elementos mais pesados que o hidrogénio. Somos realmente feitos de poeira de estrelas. Se conseguirmos dominar o poder das estrelas na Terra, a fusão poderá até vir a ser a chave para obtermos energia limpa ilimitada.

‘Peço-vos que olhem em ambas as direcções. Pois a via para o conhecimento das estrelas passa pelo átomo; e conhecimentos importantes acerca do átomo têm sido atingidos através das estrelas.’

Sir Arthur Eddington, 1928

A fusão nuclear é a junção de dois núcleos atómicos leves para formar outros mais pesados. Quando se comprimem dois núcleos de hidrogénio com força suficiente um contra o outro, eles fundem-se e produzem hélio, libertando energia – uma grande quantidade de energia – durante o processo. Gradualmente, construindo núcleos cada vez mais pesados através de uma série de reacções de fusão, todos os elementos que vemos ao nosso redor podem ser criados a partir do hidrogénio.

Um grande aperto Fazer com que dois núcleos se fundam um com o outro, mesmo que sejam os núcleos mais leves, como o hidrogénio, é incrivelmente difícil. São necessárias temperaturas e pressões enormes, e portanto a fusão só ocorre na natureza em locais extremos, como o Sol e as outras estrelas. Para que dois núcleos se fundam é preciso vencer as forças que mantêm cada um deles intactos. Os núcleos são feitos de prótons e neutrões, unidos entre si pela força nuclear forte. A força forte é dominante à escala ínfima do núcleo, e é muito mais fraca fora dele. Como os prótons têm carga positiva, as suas cargas eléctricas ir-se-ão repelir

Cronologia

1920 D.C.

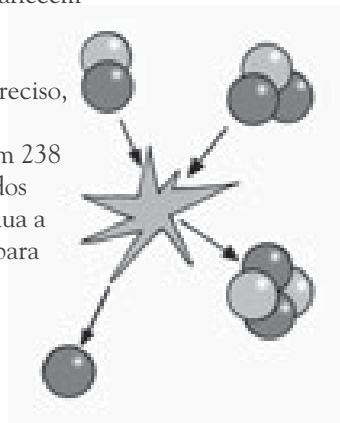
Eddington aplica a ideia de fusão às estrelas

1932

A fusão do hidrogénio é obtida em laboratório

mutuamente, fazendo com que os prótons tenham tendência a afastar-se uns dos outros. Mas a «cola» da força forte é mais poderosa, e graças a isso os núcleos permanecem intactos.

Como a força nuclear forte só actua com um alcance muito curto e preciso, a sua força combinada é maior para núcleos pequenos do que para os grandes. Para um núcleo pesado, como por exemplo o urânio, que tem 238 nucleões, a atracção mútua não vai ser tão forte para nucleões em lados opostos do núcleo. A força eléctrica repulsiva, por outro lado, continua a fazer-se sentir a distâncias grandes, e portanto torna-se mais intensa para núcleos grandes porque engloba a totalidade do núcleo. Este efeito também é ampliado pelo maior número de cargas positivas contidas nesses núcleos maiores. O efeito global deste jogo entre as duas forças é que a energia necessária para manter o núcleo intacto, dividida pelo número de nucleões, aumenta com a massa atómica até aos elementos níquel e ferro, que são muitíssimo estáveis, e a partir daí começa a diminuir para núcleos maiores. É por isso que a fissão de núcleos muito grandes ocorre com relativa facilidade, visto que eles podem ser perturbados por um qualquer encontrão.



Para a fusão, a barreira de energia que é preciso superar é mínima para os isótopos do hidrogénio, que só contêm um próton. O hidrogénio existe sob três formas: átomos «normais» de hidrogénio têm um próton rodeado por um único electrão; o deutério, ou hidrogénio pesado, tem um próton, um electrão e também um neutrão; o trítio tem mais um neutrão, de forma que é ainda mais pesado. Logo, a fusão de reacção mais simples é a combinação dos núcleos de deutério para formar trítio mais um próton isolado. Embora seja a mais simples, são necessárias temperaturas avassaladoras, 800 milhões de Kelvins, para que mesmo esta reacção possa ser desencadeada (e é por isso que o trítio é tão raro).

Reactores de fusão Na Terra, os físicos estão a tentar recriar estas condições extremas em reactores de fusão, para gerar energia. No entanto, estamos a décadas de distância de conseguir alcançar esse objectivo de forma prática. Mesmo os reactores de fusão mais avançados continuam a consumir mais energia do que aquela que libertam, por várias ordens de grandeza.

1939

Hans Bethe descreve os processos de fusão estelar

1946/1954

Fred Hoyle explica a produção de elementos mais pesados

1957

Burbidge, Burbidge, Fowler e Hoyle publicam o seu famoso artigo sobre nucleossíntese

Fusão fria

Em 1989, o mundo científico foi abalado por uma pretensão polémica. Martin Fleischmann e Stanley Pons anunciaram que tinham conseguido obter fusão nuclear num tubo de ensaio. Ao fazerem passar uma corrente eléctrica através de um recipiente de água pesada (cujos átomos de hidrogénio foram substituídos por deutério), os dois cientistas julgaram ter criado energia através de fusão «fria». Eles afirmaram que a sua experiência produziu mais energia do que aquela que lhe tinha sido fornecida, devido à fusão que teria ocorrido. Isto provocou um enorme burburinho. A maior parte dos cientistas achou que Fleischmann e Pons se tinham enganado a fazer as contas ao seu balanço energético, mas esta é uma questão que ainda não está resolvida. De vez em quando há outras declarações, sempre contestadas, de que se teria obtido fusão num laboratório. Em 2002, Rudi Taleyarkhan propôs que a fusão estaria por trás da chamada sono-luminescência, em que bolhas de um fluido emitem luz quando ficam sob o efeito de pulsos rápidos causados por ondas de ultra-sons, que as aquecem. Ainda se está a tentar decidir se será realmente possível fazer fusão num frasco num laboratório.

Obter energia através da fusão é o Santo Graal da produção energética. Comparados com a tecnologia de fissão, os reactores de fusão são relativamente limpos e eficientes. Seriam necessários pouquíssimos átomos para que se produzissem grandes quantidades de energia (devido à equação de Einstein, $E=mc^2$) e praticamente não existiriam resíduos, sendo que garantidamente não seria produzido nada tão perigoso quanto os elementos ultrapesados que saem dos reactores de fissão. A energia de fusão também não produz gases de efeito de estufa, o que nos promete uma fonte de energia auto-contida e de confiança, assumindo que o seu combustível, hidrogénio e deutério, consegue ser fabricado. Mas não é perfeita e irá produzir alguns subprodutos radioactivos, visto que há libertação de neutrões nas reacções principais, e esses neutrões têm de ser absorvidos.

Dadas as elevadíssimas temperaturas envolvidas, o mais difícil é controlar os gases escaldantes, e é por isso que, embora já tenhamos conseguido levar a cabo reacções de fusão, estas máquinas colossais só funcionam durante uns poucos segundos de cada vez. Uma equipa internacional de cientistas está a colaborar na construção de um reactor de fusão chamado *International Thermonuclear Experimental Reactor* (ITER), que irá testar a viabilidade comercial da fusão.

Poeira de estrelas As estrelas são os reactores de fusão da natureza. Hans Bethe explicou porque é que elas brilham, através da conversão de núcleos de hidrogénio (protões) em

núcleos de hélio (dois prótons e dois neutrões). Há mais partículas (positrões e neutrinos) envolvidas nesta transferência, de forma que dois dos prótons originais são transformados em neutrões no decorrer deste processo.

Os elementos mais pesados são fabricados de forma gradual dentro das estrelas, passo a passo, numa culinária de fusão. Núcleos cada vez maiores vão sendo fabricados através de uma série de fusões, primeiro do hidrogénio, depois do hélio e depois de outros elementos mais leves que o ferro, até se chegar, eventualmente, a elementos mais pesados que o ferro. As estrelas como o Sol brilham sobretudo porque estão a fundir núcleos de hidrogénio para formar hélio, e isso sucede suficientemente devagar para que os elementos mais pesados só sejam produzidos em quantidades pequenas. Nas estrelas maiores esta reacção é acelerada, devido aos elementos carbono, azoto e oxigénio estarem envolvidos noutras reacções. E por isso há mais elementos pesados a serem produzidos mais rapidamente. Assim que o hélio se faz presente é possível fazer carbono a partir dele. Assim que se faz algum carbono, ele pode combinar-se com o hélio para dar oxigénio, néon e magnésio. Estas transformações lentas decorrem durante a maior parte da vida da estrela. Elementos mais pesados que o ferro são feitos em reacções ligeiramente diferentes, de forma que gradualmente vão sendo construídas sequências de núcleos até a tabela periódica ficar completa.

As primeiras estrelas Alguns dos primeiros elementos leves não foram criados nas estrelas, mas sim na bola de fogo do próprio *big bang*. No início o universo estava tão quente que nem sequer os átomos eram estáveis. À medida que foi arrefecendo, os átomos de hidrogénio foram os primeiros a condensarem-se, juntamente com uns poquinhos de hélio e de lítio e uma quantidade ínfima de berílio. Foram estes os primeiros ingredientes para as estrelas e tudo o resto. Todos os elementos mais pesados do que estes foram criados em estrelas e ao redor delas, tendo sido depois disparados através do espaço por estrelas que explodiram, chamadas supernovas.

‘Somos pedaços de matéria estelar que ficaram frios por acidente, pedaços de uma estrela que não funcionou.’

Sir Arthur Eddington, 1882–1944

A fusão é a fonte de energia fundamental de todo o universo. Se conseguirmos dominá-la, os nossos problemas energéticos poderiam acabar. Mas isso significa sermos capazes de reproduzir o enorme poder das estrelas aqui na Terra, o que não é fácil.

a ideia resumida
Poder das estrelas

36 O modelo padrão

Protões, neutrões e electrões são apenas a ponta do icebergue da física de partículas. Os protões e neutrões são feitos de quarks ainda mais pequenos, os electrões são acompanhados por neutrinos e as forças são mediadas por uma série de bosões, incluindo os fotões. O «modelo padrão» reúne todo o zoo das partículas debaixo de uma só árvore.

Para os gregos, os átomos eram os constituintes mais pequenos da matéria. Foi só no final do século XIX que se conseguiram extrair componentes ainda mais

‘Mesmo que só exista uma teoria unificada possível, ela vai ser só um conjunto de regras e equações. O que é que instila fogo nas equações e faz um universo para elas descreverem?’

Stephen Hawking, 1988

pequenos dos átomos: os electrões, protões e neutrões. Quer isso dizer que estas três partículas são os tijolos mais básicos com que se constrói toda a matéria?

A resposta é não. Até os protões e neutrões são granulosos. São feitos de partículas ainda mais minúsculas chamadas quarks. E não ficamos por aqui. Tal como os fotões transportam forças electromagnéticas, há uma miríade de outras partículas que transmitem as outras forças fundamentais. Os electrões são indivisíveis, tanto quanto sabemos, mas estão emparelhados com

neutrinos que quase não têm massa. As partículas também têm os seus duplos de antimatéria. Tudo isto soa bastante complicado, e na verdade é-o, mas esta pletora de partículas pode ser compreendida graças a uma única teoria, a que se chama o modelo padrão da física de partículas.

Cronologia

c. 400 A.C.

Demócrito propõe a ideia de átomos

Escavação No começo do século XX, os físicos sabiam que a matéria era feita de prótons, nêutrons e electrões. Niels Bohr tinha explicado a forma segundo a qual, devido à teoria quântica, os electrões se dispunham numa série de camadas em torno do núcleo, como as órbitas dos planetas em redor do Sol. As propriedades dos núcleos eram ainda mais estranhas. Apesar das suas cargas positivas a repelirem-se entre si, os núcleos conseguiam albergar dezenas de prótons, juntamente com nêutrons, todos juntos e comprimidos num núcleo muito pequeno e rígido, cuja coesão se deve à força nuclear forte. Mas à medida que se descobria, através da radioactividade, como é que os núcleos se partiam ao meio (via fissão) ou se juntavam uns aos outros (via fusão), tornou-se claro que haviam mais fenómenos que precisavam de ser explicados.

Primeiro, a combustão do hidrogénio para dar hélio no Sol, através da fusão, implicava uma outra partícula, o neutrino, que transforma prótons em nêutrons. Em 1930, a existência do neutrino foi inferida para explicar o decaimento de um nêutron para um próton e um electrão – o decaimento radioactivo beta. O neutrino em si só foi descoberto em 1956, e praticamente não tem massa. Logo, mesmo nos anos 1930, havia muitas pontas soltas. Puxando por algumas dessas pontas levou a que, nos anos 1940 e 1950, se tenha procurado por outras partículas, de forma que a colecção cresceu.

Foi através destas procuras que evoluiu o modelo padrão, que é uma árvore genealógica de partículas subatómicas. Existem três tipos básicos de partículas fundamentais: os «hadrões» feitos de «quarks», outras partículas chamadas «leptões» em que se incluem os electrões e depois partículas (bosões) que transmitem as forças, como os fotões. Cada um dos quarks e dos leptões tem também uma antipartícula correspondente.

Quarks Nos anos 1960, ao disparar electrões contra prótons e contra nêutrons, os físicos deram-se conta de que eles tinham dentro de si partículas ainda mais pequenas, chamadas quarks. Os quarks existem em trios. Têm três «cores»: vermelho, azul e verde. Da mesma maneira que os electrões e os prótons têm carga eléctrica, os quarks têm uma «carga de cor», que se conserva quando os quarks mudam de um estado para outro. A carga de cor não tem nada a ver com as cores da luz visível – é só uma forma de os físicos serem inventivos e escolherem uma forma arbitrária de dar nomes ao mundo esquisitíssimo das propriedades quânticas dos quarks.

1930 D.C.

Wolfgang Pauli prevê a existência do neutrino

1956

Os neutrinos são detectados

Anos 1960

Proposta dos quarks

1995

O quark *top* é descoberto

“O elemento criativo na mente de um homem... emerge de forma tão misteriosa quanto aquelas partículas elementares que se materializam numa existência momentânea em grandes ciclotrões, para desaparecerem logo a seguir como fantasmas infinitesimais.”

Sir Arthur Eddington, 1928

Tal como as cargas eléctricas produzem uma força, as cargas de cor (os quarks) também podem exercer forças entre si. A força da cor é transmitida por uma partícula de força chamada «gluão». A força da cor torna-se mais intensa à medida que a distância entre os quarks aumenta, de forma que eles ficam ligados uns aos outros, como se estivessem atados por uma tira de elástico. Devido aos laços estabelecidos pelo campo de força da cor serem tão fortes, os quarks não conseguem existir isolados e têm de estar sempre ligados uns aos outros, em combinações que são globalmente neutras para a cor (sem nenhuma carga de cor). Há diversas possibilidades, nomeadamente tripletos a que se chama bariões («bari» é um prefixo que significa pesado), nos quais se contam os prótons e neutrões comuns, ou pares de quark-antiquark (chamados mesões).

Os quarks, para lá de terem cargas de cor, existem em seis tipos distintos, a que chamamos «sabores». Cada «geração» de quarks, com massas cada vez maiores, é composta por um par de quarks. Os mais leves são os quarks *up* e *down*; a seguir vêm os *strange* e *charm*; finalmente, o par mais pesado consiste nos quarks *bottom* e *top*. Os quarks *up*, *charm* e *top* têm carga eléctrica $+\frac{2}{3}$ e os *down*, *strange* e *bottom* têm carga $-\frac{1}{3}$. Ou seja, os quarks têm cargas eléctricas fraccionárias, comparadas com as cargas $+1$ para os prótons ou -1 para os electrões. O que implica que são necessários três quarks para se fazer um próton (dois *up* e um *down*) ou um neutrão (dois *down* e um *up*).

Leptões A segunda classe de partículas, os leptões, estão relacionadas com os electrões, aliás, incluem-nos. Mais uma vez existem três gerações com massas progressivamente maiores: os electrões, os muões e os taus. Os muões são 200 vezes mais pesados do que os electrões, e os taus 3700 vezes. Cada um deles tem também associada uma partícula chamada neutrino (neutrino do electrão, do muão ou do tau) que não possui carga. Os neutrinos quase não têm massa e praticamente não interagem com nada. Podem atravessar a Terra toda sem darem por ela, e por causa disso são difíceis de apanhar. Todos os leptões têm antipartículas.

Interacções As forças fundamentais são mediadas pela troca de partículas. Da mesma forma que uma onda electromagnética pode ser encarada como sendo um jacto de fótons, pode-se pensar na força nuclear fraca como sendo transmitida pelas partículas *W* e *Z*, enquanto a força nuclear forte é transmitida através de gluões. Tal como o fóton, estas outras partículas são bósons, que podem existir todas no mesmo estado quântico em

simultâneo. Os quarks e léptões são fermiões e já não conseguem essa proeza.

Esmagar partículas Como é que descobrimos todas estas partículas subatómicas? No início do século XX os físicos descobriram o funcionamento interno dos átomos e das partículas usando a força bruta, pura e simplesmente esmagando-as. Já houve quem descrevesse a física de partículas como sendo equivalente a pegar num complicadíssimo relógio suíço e esmagá-lo com um martelo para olhar para os estilhaços e tentar perceber como é que ele funciona. Os aceleradores de partículas utilizam ímanes gigantesco para acelerar partículas até elas atingirem velocidades extremamente elevadas, para depois forçar esses feixes de partículas a chocar contra um alvo ou contra outro feixe em sentido oposto. A velocidades modestas, as partículas não se partem muito e libertam-se as partículas das gerações mais leves. Como a massa é equivalente a energia, é preciso um feixe de partículas de uma energia superior para se conseguirem libertar as partículas de gerações posteriores (mais pesadas).

Depois disso é preciso identificar as partículas produzidas nos esmagadores de átomos, e os físicos de partículas fazem isto fotografando as suas trajetórias à medida que elas atravessam um campo magnético. No campo magnético, as partículas carregadas positivamente inclinam-se para um lado, e as negativas para o outro. A massa da partícula também dita o quão depressa ela atravessa o detector, e quanto da sua trajetória é encurvada pelo campo magnético. Logo, as partículas leves quase não se encurvam, e as partículas pesadas podem chegar a descrever espirais. Estudando todas estas características ao longo do detector, e comparando-as com aquilo que esperam das suas teorias, os físicos de partículas conseguem identificar cada partícula.

Uma das coisas que ainda não está incluída no modelo padrão é a gravidade. O «gravitão», ou seja, a partícula que transmite a força da gravidade, já foi postulado mas até agora é apenas uma ideia.

Fermiões			
Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Léptões	e eléctron	μ muão	τ tau
	ν_e neutrino do electrão	ν_μ neutrino do muão	ν_τ neutrino do tau

Bosões	
Portadores de forças	γ fotão
	W Bosão W
	Z bosão Z
	g gluão
	bosão de Higgs ?

a ideia resumida
Tudo em família

37 Diagramas de Feynman

Os diagramas de Feynman são esquemas inteligentes que servem para abreviar equações complicadas da física de partículas. Cada interacção entre partículas pode ser desenhada como três linhas a convergir para um ponto, duas delas simbolizando as partículas que estão a chegar e a partir e a terceira mostrando a partícula que carrega a força. Ao somar muitos destes diagramas, os físicos são capazes de calcular as probabilidades de ocorrência das interacções.

Feynman gostava tanto dos seus diagramas que os pintou nos lados da sua carrinha. Quando alguém lhe perguntou porquê, ele limitou-se a responder «porque eu sou Richard Feynman».

Richard Feynman foi um físico de partículas da Califórnia muito carismático. Ele inventou uma nova linguagem simbólica entretanto aceite pela comunidade científica, para descrever as interacções entre as partículas. Para abreviar equações matemáticas complicadas, Feynman limitou-se a desenhar setas. Cada uma delas representa uma partícula, uma a chegar e a outra a partir, mais outra seta ondulada a representar a interacção. Assim, todas as interacções entre partículas podem ser representadas como três setas a convergirem para um ponto, a que chamamos vértice. É possível construir interacções mais complicadas juntando vários destes esquemas.

Os diagramas de Feynman são mais do que apenas uma ferramenta gráfica. Eles não só ajudam os físicos a ver quais os mecanismos pelos quais as partículas subatómicas interagem; desenhá-los também ajuda os físicos a calcular a probabilidade de que essa interacção ocorra.

Cronologia

1927 D.C.

Começam os trabalhos acerca da teoria quântica de campo

Anos 1940

A electrodinâmica quântica é desenvolvida

Rascunhos Os diagramas de Feynman representam interacções de partículas utilizando uma série de setas para mostrar as trajectórias das partículas envolvidas. Regra geral, os diagramas são desenhados de tal forma que o tempo aumenta da esquerda para a direita, de forma que electrões a chegar ou a partir seriam desenhados como setas a apontar para a direita. As setas geralmente são desenhadas inclinadas, para indicar movimento. Para as antipartículas, porque elas são equivalentes a partículas reais a movimentarem-se para trás no tempo, as suas setas apontam para trás, da direita para a esquerda. Nesta página mostram-se alguns exemplos.

Este diagrama poderia representar um electrão a emitir um fóton. O electrão a chegar (seta da esquerda) sofre uma interacção electromagnética na intersecção entre as três linhas que produz outro electrão, que se afasta (seta da direita) e um fóton (a linha ondulada). A partícula não está identificada – só o mecanismo da sua interacção. Poderia muito bem ser um próton a emitir um fóton.



Aqui, o fóton incidente, ou outra partícula, absorve um fóton para produzir um segundo electrão, mais energético.



Neste caso as setas estão invertidas, logo estas devem ser antipartículas. Este diagrama pode descrever um anti-electrão, ou positrão (seta da esquerda) a absorver um fóton para produzir outro positrão (seta da direita).



E aqui um electrão e um positrão combinam-se, aniquilando-se para darem um fóton de energia pura.



Dois ou mais vértices triplos podem ser combinados entre si, mostrando uma sequência de acontecimentos. Neste exemplo uma partícula e antipartícula aniquilam-se criando um fóton, que depois decai num outro par partícula-antipartícula.



Estes vértices podem ser utilizados para representar muitos tipos diferentes de interacções. Podem ser usados para quaisquer partículas, até os quarks e também os leptões, e as suas respectivas interacções, usando as forças electromagnética, nuclear fraca ou forte. Todos estes

1945

Investigação e uso de bombas atómicas

1975

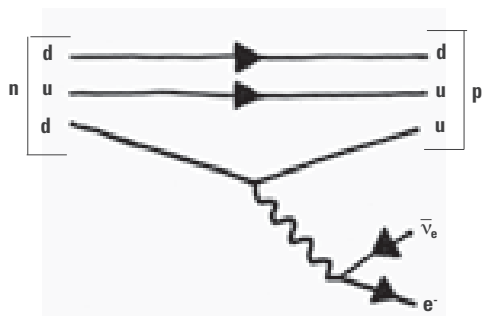
A cromodinâmica quântica é proposta

RICHARD FEYNMAN 1918–88

Richard Feynman foi um físico brilhante e irreverente. Obteve uma classificação perfeita no exame de admissão a Princeton, atraindo a atenção de gente como Einstein. Tendo-se juntado ao projecto Manhattan ainda jovem, Feynman dizia ter observado a primeira explosão de teste directamente, dizendo a si mesmo que era seguro olhar através do vidro da janela de um carro porque ele iria bloquear os raios ultravioleta. Entediado e encurralado no deserto em Los Alamos, Feynman arrombava os cadeados dos arquivos, adivinhando os números que os físicos escolheriam para combinação, como o logaritmo natural $e=2,71828\dots$ Deixava recados por brincadeira, e os seus colegas começaram a pensar que havia um espião entre eles. Começou também a tocar tambor como entretenimento, o que lhe valeu a

reputação de ser excêntrico. Feynman mudou-se para Caltech depois da guerra, onde se divertiu a ensinar e onde lhe chamaram «o grande explicador», tendo escrito muitos livros, incluindo as famosas *Feynman Lectures on Physics*. Fez parte do comité de investigação ao desastre do Challenger, que investigou a explosão do vaivém, e não se coibiu de fazer ouvir a sua voz. O seu trabalho incluiu o desenvolvimento da QED, a física dos superfluidos e da força nuclear fraca. Mais tarde na sua carreira estabeleceu os princípios da computação quântica e da nanotecnologia, num seminário intitulado «Há muito espaço lá em baixo.» Feynman era um espírito aventureiro e gostava de viajar. Dado o seu talento para símbolos, chegou a tentar decifrar hieróglifos Maia.

diagramas obedecem a umas quantas regras básicas. A energia tem de ser conservada, as linhas que entram e deixam o diagrama têm de corresponder a partículas reais (por exemplo, prótons ou neutrões, e não quarks livres, que não podem existir isoladamente), mas os estágios intermédios podem envolver quaisquer partículas subatómicas e partículas virtuais, desde que elas sejam todas convertidas em partículas reais no final.



Esta imagem representa o decaimento radioactivo beta. À esquerda está um neutrão, composto de dois quarks «down» e um quark «up». É transformado, através da interacção, num próton, que consiste em dois quarks up e um quark down, mais um electrão e um antineutrino. Estão envolvidas duas interacções. Um dos quarks down do neutrão torna-se num quark up, produzindo um bóson W (representado

como linha ondulada), que é um dos mediadores da força nuclear fraca. O bóson W vai depois decair, dando um electrão e um antineutrino. O bóson W não é observado nos produtos da interacção, mas está envolvido no estado intermédio.

Probabilidade Estes diagramas não são só abreviaturas convenientes para se visualizarem as interacções – também nos podem dizer o quão prováveis essas interacções são. Na realidade, são também representações matemáticas poderosíssimas de equações complicadas. Para conseguir calcular quão provável é uma interacção é preciso saber quantas maneiras há de obter o mesmo resultado. É aqui que os diagramas realmente se tornam úteis. Desenhando todas as variações diferentes das interacções, que é como quem diz todas as formas diferentes segundo as quais conseguem partir do estado inicial para chegar ao estado final, com muitas interacções, é possível calcular as probabilidades de cada uma dessas possibilidades contando-as.

O físico de partículas John Ellis utilizou desenhos parecidos com os de Feynman, mas chamou-os diagramas pinguim por causa de uma aposta que fez com um dos seus estudantes: se perdesse um jogo de dardos, teria de usar a palavra pinguim no seu próximo artigo. Os seus diagramas estavam arranjados verticalmente nas páginas, e ele pensou que eram parecidos com pinguins. O nome manteve-se.

QED Feynman inventou os seus diagramas ao desenvolver a electrodinâmica quântica (QED) nos anos 1940. O raciocínio por trás da QED é muito parecido com o princípio de Fermat para a propagação da luz: a luz segue todos os caminhos possíveis, mas é o caminho mais rápido que é o mais provável, e é nesse que a maior parte da luz viaja em fase. Aplicando uma ideia parecida aos campos electromagnéticos, a teoria quântica desenvolveu-se a partir de 1927 até levar à QED.

A QED descreve as interacções electromagnéticas, mediadas pela troca de fotões, e combina a mecânica quântica com uma descrição do campo eléctrico e das partículas subatómicas. Foi ao tentar calcular as probabilidades para todas as interacções possíveis que Feynman criou a sua notação gráfica. Depois da QED, os físicos expandiram estas ideias para elas englobarem o campo das forças de cor dos quarks, uma teoria chamada cromodinâmica quântica, ou QCD. E depois disso a QED juntou-se à força nuclear fraca para formarem uma força «electrofraca» combinada.

a ideia resumida

Abordagem em três direcções

38 A partícula de Deus

Enquanto caminhava nas *Highlands* da Escócia em 1964, o físico Peter Higgs pensou numa maneira de dar massa às partículas. Chamou a isto a sua «única grande ideia». As partículas parecem ter massa porque são travadas enquanto estão a nadar através de um campo de forças, a que hoje chamamos o campo de Higgs. Esse campo é carregado pelo bóson de Higgs, a que o laureado Nobel Leon Lederman se referiu como «a partícula de Deus».

Porque é que as coisas têm massa? Um camião é pesado porque tem uma data de átomos, cada um dos quais podendo por sua vez ser relativamente pesado. O aço tem átomos de ferro, e eles estão bem a meio da tabela periódica. Mas porque é que um átomo é pesado? Afinal de contas, ele é sobretudo feito de espaço vazio. Porque é que um protão é mais pesado que um electrão, ou um neutrino, ou um fóton?

Embora as quatro forças, ou interacções, fundamentais fossem bem conhecidas nos anos 1960, cada uma delas dependia de partículas mediadoras muito diferentes. Os fótons transportam a informação nas interacções electromagnéticas, os gluões ligam os quarks entre si através da força nuclear forte e os bósons W e Z transportam as forças nucleares fracas. Mas os fótons não têm massa, enquanto os bósons W e Z são muitíssimo pesados, cem vezes mais pesados do que o protão. Porque é que estas partículas são tão diferentes? Esta discrepância era particularmente gritante visto que as teorias

Cronologia

1687 D.C.

Os *Principia* de Newton apresentam equações para a massa

das forças electromagnética e fraca podiam ser combinadas, numa teoria electrofraca. Mas essa teoria não previa que as partículas da força nuclear fraca, os bosões W e Z, tivessem massa. Deveriam ser tal e qual o fóton, sem massa. Quaisquer outras combinações das forças fundamentais, como foi tentado em teorias de grande unificação, depararam-se com o mesmo problema. Os mediadores das forças não deviam ter nenhuma massa. Então porque é que eles não são todos como o fóton?

Movimento lento A grande ideia de Higgs consistiu em pensar nestes mediadores de forças como estando a ser travados por estarem a atravessar um campo de forças de fundo. Esse campo, a que hoje chamamos o campo de Higgs, também opera pela transferência de bosões, chamados bosões de Higgs. Imaginem deixarem cair um berlinde para dentro de um copo. O berlinde vai demorar mais tempo a chegar ao fundo se o copo estiver cheio de água do que se o copo estiver vazio e cheio de ar. É como se o berlinde tivesse uma massa maior quando está na água – a gravidade demora mais tempo a fazê-lo atravessar o líquido. O mesmo raciocínio poderia ser aplicado às vossas pernas quando vocês andam na água – elas parecem pesar mais, e o vosso movimento torna-se mais lento. O berlinde vai andar ainda mais devagar se vocês o deixarem cair para dentro de um copo cheio de mel, demorando um bom bocado a chegar ao fundo. O campo de Higgs actua da mesma maneira, como um líquido viscoso. A força de Higgs retarda o movimento das outras partículas carregadoras de forças, dando-lhes, efectivamente, uma massa. Actua mais fortemente sobre os bosões W e Z do que sobre os fótons, fazendo com que eles pareçam ser mais pesados.

Este campo de Higgs é muito parecido com um electrão a mover-se através de uma rede cristalina de núcleos carregados positivamente, como por exemplo um metal. O electrão é um pouco desacelerado porque é atraído por todas as cargas positivas, de tal forma que parece ter uma massa maior do que a que tem na ausência destes iões. Isto é devido à acção da força electromagnética, mediada pelos fótons. O campo de Higgs actua de forma parecida, mas são os bosões de Higgs que carregam a força. Também podem pensar neste fenómeno como aquilo que sucede quando uma estrela de cinema entra numa festa de cocktails cheia de Higgs.

‘A coisa mais óbvia era tentar esta ideia na teoria de gauge mais simples de todas, a electrodinâmica – quebrar as suas simetrias para ver o que é que realmente acontecia.’

Peter Higgs, nascido em 1929

1964

Higgs tem a sua inspiração acerca daquilo que dá massa às partículas

2007

O *Large Hadron Collider* é construído no CERN

Quebra de simetria num íman

A temperaturas muito elevadas, todos os átomos de um íman ficam desordenados, de tal forma que os seus campos magnéticos próprios ficam completamente desalinhados de forma aleatória e o material não é magnético. Mas quando a temperatura cai abaixo de um certo valor, a que se chama a temperatura de Curie, os dipólos magnéticos alinham-se todos e produzem um campo magnético global.

A estrela vai ter dificuldade em atravessar a sala devido a todas as interações sociais que a obrigam a andar devagar.

Se o campo de Higgs dá massa aos outros portadores de forças, qual é a massa do bóson de Higgs? E como é que ele adquire a sua própria massa? Isto não é uma situação do tipo quem veio primeiro, o ovo ou a galinha? Infelizmente, as teorias não prevêem a massa do bóson de Higgs, embora prevejam que ele é necessário para o modelo padrão da física de partículas. Por isso, os físicos esperam observá-lo, mas não sabem quão difícil isso vai ser, ou quando é que a partícula vai aparecer (ainda não foi detectada). Graças à procura incessante por partículas com as propriedades do bóson de Higgs, sabemos que a sua massa tem de ser superior às energias que já foram alcançadas experimentalmente.

Quer isto dizer que é muito pesado, mas temos de esperar para descobrir exactamente quanto.

A arma do crime A próxima máquina que vai procurar a sério pela partícula de Higgs é o Large Hadron Collider (LHC) no CERN, na Suíça. O CERN, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (Conselho Europeu para a Pesquisa Nuclear) é um laboratório de física de partículas enorme próximo de Genebra. Tem anéis de túneis, o maior deles com 27 km de comprimento, 100 metros debaixo do chão. No LHC ímanes gigantes aceleram prótons, formando um feixe que dá voltas a esta pista enorme. Estes prótons são constantemente acelerados de cada vez que dão uma volta, andando cada vez mais depressa. Criam-se dois feixes a moverem-se em sentidos opostos e, quando estão a andar à velocidade máxima, os feixes são disparados um contra o outro, de forma que os prótons acelerados esmagam-se uns contra os outros, em colisões frontais. As enormes energias que são criadas permitem que seja produzida, temporariamente, uma grande quantidade de partículas pesadas, que serão registadas por detectores, bem como os produtos dos decaimentos dessas partículas, se elas tiverem um tempo de vida muito curto. O objectivo do LHC é descobrir entre mil milhões de outras assinaturas, uma que conduza à partícula de Higgs. Os físicos sabem do que estão à

procura, mas ainda assim vai ser difícil encurralar a nova partícula: é possível que a partícula só apareça por uma fracção de segundo antes de desaparecer formando uma cascata de outras partículas. Logo, em vez de verem o Higgs propriamente dito, os físicos, para deduzirem a sua existência, terão de fazer como os detectives, que encontram a arma do crime e têm de inferir o que sucedeu para chegarem ao culpado.

Quebra de simetria Quando é que um bosão de Higgs poderia aparecer? E como é que chegamos deste ponto aos fotões e aos outros bosões? Como o bosão de Higgs tem de ser muito pesado, ele só pode aparecer para energias extremas e, devido ao princípio da incerteza de Heisenberg (ver página 104), só pode fazê-lo durante intervalos de tempo muitíssimo pequenos. As teorias admitem que, pouco tempo depois do início do universo, as quatro forças estavam unidas umas às outras, formando uma única superforça. À medida que o universo arrefeceu, as quatro forças fundamentais emergiram daí, através de um processo chamado quebra de simetria.

A quebra de simetria marca o ponto em que algo sucede e remove a simetria de um sistema. Por exemplo, imaginem uma mesa de jantar redonda com os talheres e guardanapos já postos. A mesa é simétrica porque parece idêntica independentemente de onde se sentam. Basta uma pessoa pegar num guardanapo para a simetria desaparecer – vocês passam a ser capazes de dizer onde estão relativamente a essa posição. Logo, ocorreu uma quebra de simetria. Este acontecimento simples pode ter efeitos em cadeia – por exemplo, pode implicar que toda a gente pegue no guardanapo à sua esquerda para estar de acordo com o primeiro acontecimento. O padrão que se segue é, portanto, desencadeado por um acontecimento aleatório. De forma parecida, quando o universo arrefece os acontecimentos fazem com que as forças se separem uma a uma.

E se os cientistas não detectarem o bosão de Higgs no LHC, até isso será um resultado interessante. Desde os neutrinos até ao quark top, há 14 ordens de grandeza de massa que o modelo padrão tem de explicar. Mesmo com o bosão de Higgs, que é a peça do puzzle que falta, é muito difícil fazer isso. Se encontrarmos esta partícula de Deus, vai tudo ficar bem, mas se ela não existir então o modelo padrão vai ter de ser consertado. E isso vai exigir nova física. Nós julgamos que conhecemos todas as partículas do universo – o bosão de Higgs é o único elo perdido que nos falta.

a ideia resumida
Nadar contra a maré

39 A teoria das cordas

Embora a maior parte dos físicos esteja satisfeita em trabalhar com o incrivelmente bem-sucedido modelo padrão, por mais incompleto que ele esteja, outros estão à procura de nova física mesmo antes de o modelo padrão ter sido testado até aos seus limites. Um grupo de físicos, seguindo uma versão moderna da dualidade onda-partícula, está a tentar explicar os padrões das partículas fundamentais tratando-as como ondas numa corda. Esta ideia inflamou a imaginação dos *media*, e chama-se teoria das cordas.

Os teóricos das cordas não estão satisfeitos com a ideia de que as partículas fundamentais, como os quarks, electrões e fotões, sejam pedaços indivisíveis de matéria ou de energia. Os padrões que lhes dão uma massa específica, uma carga ou uma energia associada, sugerem um outro nível de organização. Estes cientistas acreditam que esses padrões estão a revelar harmonias mais profundas. Cada quantum de massa ou de energia é uma nota harmónica da vibração de uma pequena corda. Ou seja, as partículas podem ser pensadas como tiras ou anéis de cordas a vibrarem, em vez de pedaços sólidos. De certa forma, isto é uma nova versão do amor que Kepler tinha pelos sólidos geométricos ideais. É como se as partículas não fossem mais do que um padrão de notas que sugere uma escala harmónica, tocada numa única corda.

Vibrações Na teoria das cordas, as cordas não são aquelas a que nós estamos habituados numa guitarra, por exemplo. A corda de uma guitarra

Cronologia

1921 D.C.

A teoria de Kaluza-Klein é proposta para unificar o electromagnetismo e a gravidade

1970

Yoichiro Nambu descreve a força nuclear forte usando cordas na mecânica quântica

vibra em três dimensões do espaço, ou talvez pudéssemos aproximar este número por dois se imaginarmos que a corda está estrangida a um plano correspondente ao seu comprimento e ao movimento para um lado e para o outro. Mas as cordas subatômicas vibram só numa dimensão, ao contrário das zero dimensões das partículas pontuais. A sua extensão não é visível para nós mas, para fazerem as contas, os cientistas calculam as vibrações das cordas ao longo de mais dimensões, chegando a 10 ou 11. O nosso mundo tem três dimensões de espaço e mais uma de tempo. Mas os teóricos das cordas acham que existem muito mais dimensões que nós não vemos, dimensões essas que estão todas enroladas de tal maneira que nós não as notamos. É nestes outros mundos que as cordas das partículas vibram.

As cordas podem formar aros abertos ou fechados, mas à parte isso são todas iguais. De forma que toda a diversidade das partículas fundamentais emerge apenas do padrão de vibração da corda, das suas harmónicas, não do material da própria corda.

Uma ideia invulgar A teoria das cordas é exclusivamente matemática. Nunca ninguém viu uma corda, e ninguém faz a mínima ideia de como se pode ter a certeza de que elas existem. Quer isto dizer que ainda ninguém foi capaz de pensar numa experiência que consiga determinar se a teoria é ou não verdadeira. Diz-se que há tantas teorias de cordas quanto teóricos de cordas. E isto coloca a teoria numa posição incómoda entre os cientistas.

‘Ter aquelas dimensões extra e daí as muitas formas segundo as quais a corda pode vibrar em tantas direcções diferentes acaba por ser a chave para se ser capaz de descrever todas as partículas que observamos.’

Edward Witten, nascido em 1951

O filósofo Karl Popper pensava que a ciência progride sobretudo através da falseabilidade. Vocês têm uma ideia, testam-na com uma experiência e se ela for falsa então excluem qualquer coisa, de forma que aprendem algo de novo e a ciência progride. Se as observações estão de acordo com o modelo, então vocês não aprenderam nada de novo. Como a teoria das cordas ainda não está completamente desenvolvida, ela não tem nenhuma hipóteses que possam ser definitivamente refutadas. E já que há muitas variações da teoria, muitos cientistas acham que ela não é verdadeiramente ciência. Há imensas discussões acerca de ela ser ou não útil, que

meados dos anos 1970

Obtida uma teoria quântica da gravidade

1984–6

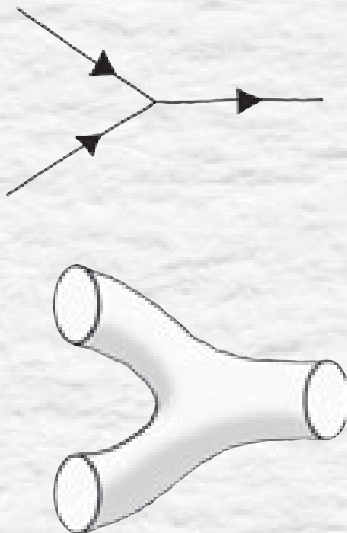
A rápida expansão da teoria das cordas «explica» todas as partículas

anos 1990

Witten e outros desenvolvem a teoria-M em 11 dimensões

Teoria-M

As cordas são essencialmente linhas. Mas num espaço multidimensional elas são um caso limite de geometrias que poderão incluir folhas e outras formas com muitas dimensões. Esta teoria generalizada chama-se teoria-M. Não há só uma palavra que corresponda ao «M», mas poderá ser «membrana» ou «mistério». Uma partícula a mover-se através do espaço desenha uma linha; se a partícula pontual tiver sido mergulhada em tinta ela vai traçar um caminho linear, a que chamamos a sua linha do mundo. Uma corda, digamos em forma de anel, iria desenharmos um cilindro. E por isso dizemos que ela tem uma folha do mundo. Onde estas folhas se intersectam, e onde as cordas se quebram e recombinaem, ocorrem interacções. De forma que a teoria-M é, na realidade, um estudo das formas de todas estas folhas num espaço 11-dimensional.



enchem as páginas destinadas às cartas dos leitores em revistas científicas e até mesmo em jornais, mas os teóricos das cordas acham que a sua demanda vale a pena.

Teoria geral Ao tentar explicar todo o zoo das partículas e das interações com uma descrição única, a teoria das cordas é uma tentativa de nos aproximarmos de uma «teoria geral», uma teoria unificadora das quatro forças fundamentais (o electromagnetismo, a gravidade e as forças nucleares forte e fraca) e explica as massas das partículas e todas as suas propriedades. Seria uma teoria realmente fundamental, que estaria na base de tudo. Originalmente, Einstein tentou unificar a mecânica quântica e a gravidade nos anos 1940, mas nunca conseguiu, nem ninguém conseguiu desde então. Einstein foi criticado pelo seu trabalho, porque se pensava que era impossível e uma perda de tempo. A teoria das cordas traz a gravidade para as equações, e por isso o seu potencial atrai pessoas para trabalharem nela. No entanto, a teoria ainda tem de percorrer um longo caminho até poder ser formulada de forma precisa, quanto mais ser verificada.

A teoria das cordas surgiu como uma curiosidade, devido à beleza da sua matemática. Nos anos 1920, Theodor Kaluza usou vibrações harmónicas de uma maneira diferente para descrever

algumas propriedades pouco comuns das partículas. Os físicos deram-se conta de que aquela mesma matemática poderia também descrever alguns fenómenos quânticos. Essencialmente, a matemática ondulatória funciona bem quer para a mecânica quântica quer para a sua extensão à física de partículas. Isto foi depois desenvolvido para dar primeiras versões das teorias de cordas. Há muitas variantes, e ainda estamos a alguma distância de uma teoria que abranja tudo.

Uma teoria geral é um objectivo para alguns físicos, que em regra são reducionistas e pensam que basta compreender os tijolos do edifício para se entender o mundo inteiro. Se compreendem um átomo, construído a partir de cordas vibrantes, então é possível inferir toda a química, toda a biologia e por aí fora. Outros cientistas acham que toda esta atitude é ridícula. Como é que o conhecimento dos átomos vos pode dizer o que quer que seja acerca de teoria social ou dos impostos? Nem tudo pode ser aplicado a escalas diferentes de forma tão simples. Eles acreditam que uma tal teoria descreve o mundo como sendo um ruído sem sentido de interações subatómicas, algo de niilista e errado. O ponto de vista reducionista ignora o comportamento macroscópico evidente, como os padrões dos furacões ou o caos, e é descrito pelo físico Steven Weinberg como sendo «arrepia e impessoal. Tem de ser aceite tal como é, não porque gostemos dele mas porque é dessa forma que o mundo funciona».

A teoria, ou melhor, as teorias das cordas continuam num estado de transição. Ainda não emergiu nenhuma teoria final, mas isso é capaz de demorar algum tempo, porque a física se tornou tão complicada que há imensa coisa para incluir nessa teoria única. Pensar no universo como a vibração de muitas harmonias tem o seu charme. Mas os seus aderentes também acabam muitas vezes por deslizar para uma perspectiva árida, ficando tão compenetrados com os detalhes mais finos que diminuem a importância de padrões a larga escala. E assim os teóricos das cordas poderão continuar nas margens da física até que emerja uma visão mais forte. Mas, dada a natureza da ciência, é bom que eles estejam à procura, e que não o façam nos sítios do costume.

“Não gosto que eles não estejam a calcular o que quer que seja. Não gosto que eles não verifiquem as suas ideias. Não gosto que quando alguma coisa está em desacordo com uma experiência, eles cozinhem uma explicação – um remendo para dizer, «Bom, ainda pode ser verdade».”

Richard Feynman, 1918–88

a ideia resumida

Harmonias universais

40 A relatividade restrita

As leis do movimento de Newton descrevem o movimento da maioria dos objectos. Mas em 1905 Albert Einstein mostrou que acontecem efeitos estranhos quando as coisas se movem muito depressa. Se observassem um objecto a aproximar-se da velocidade da luz veriam que ele se tornaria mais pesado, o seu comprimento contrair-se-ia e envelheceria mais lentamente. Isso acontece porque nada pode viajar mais depressa que a velocidade da luz, de forma que os próprios tempo e espaço distorcem-se ao aproximarem-se deste limite de velocidade universal.

As ondas de som ecoam através do ar, mas as suas vibrações não conseguem atravessar o espaço vazio, em que não existem átomos. De forma que é bem verdade que «no espaço ninguém vos pode ouvir gritar». Mas a luz é capaz de se espalhar através do espaço vazio, algo que sabemos muito bem dado que vemos o Sol e as estrelas. Será que o espaço está cheio de um meio especial, uma espécie de ar eléctrico, através do qual as ondas electromagnéticas se propagam? No final do século XIX os físicos achavam que sim, e acreditavam que o espaço estava permeado por um gás, ou «éter», através do qual a luz radiava.

A velocidade da luz No entanto, em 1887, uma experiência famosa provou que o éter não existia. Como a Terra se move em torno do Sol, a sua posição no espaço está sempre a mudar. Se o éter estivesse fixo, então

Cronologia

1881 D.C.

Michelson e Morley não são capazes de verificar a existência do éter

1905

Einstein publica a teoria da relatividade restrita

Paradoxo dos gémeos

Imaginem que a dilatação do tempo se aplica aos humanos. Bom, em princípio é possível. Se o vosso gémeo idêntico fosse enviado para o espaço numa nave suficientemente rápida e durante tempo suficiente, ele envelheceria mais devagar do que vocês, ainda aqui na Terra. Quando regressasse, é bem possível que desse convosco já velhinhos, estando ele na flor da juventude. Embora isto pareça impossível, não é de facto um paradoxo, porque o gémeo viajante espacial iria sofrer forças poderosas que permitiriam que uma tal mudança ocorresse. Devido a esta mudança de tempo, acontecimentos que parecem ser simultâneos num referencial poderão não o ser noutro. E tal como o tempo corre mais lentamente, os comprimentos também se contraem. O objecto, ou pessoa, que se estivesse a movimentar a essa velocidade não notaria nenhum efeito, seria algo só notado por um observador.

Albert Michelson e Edward Morley construíram uma experiência muito inteligente que detectaria qualquer movimento contra ele. Eles compararam dois feixes de luz viajando através de percursos diferentes, disparados fazendo ângulos rectos entre si e reflectidos em espelhos idênticos igualmente distantes. Da mesma maneira que um nadador demora menos tempo a atravessar um rio de uma margem até à outra, ida e volta, do que demora a nadar a mesma distância indo contra a corrente e depois a favor dela, eles esperavam encontrar um resultado parecido para a luz. A corrente do rio imita o movimento da Terra através do éter. Mas não havia diferença nenhuma – os feixes de luz regressavam às suas posições iniciais exactamente ao mesmo tempo. Não interessava em que direcção ia a luz, ou como é que a Terra se estava a mover, a velocidade da luz ficava inalterada. A velocidade da luz não era afectada pelo movimento. A experiência provou que o éter não existia – mas foi preciso Einstein para perceber isso.

Tal como o princípio de Mach (ver página 4), isto significava que não havia nenhuma rede fixa de fundo relativamente à qual os objectos se movimentavam. Ao contrário das ondas de água ou das ondas de som, a luz aparentava mover-se sempre à mesma velocidade. Isto era esquisito e muito diferente das nossas experiências usuais, em que as velocidades se somam entre si. Se vocês estão a conduzir um carro a 50 km/h e passa um outro carro por vocês a 65 km/h, é como se vocês estivessem estacionários e o outro estivesse a andar a 15 km/h relativamente a vocês. Mas mesmo que vocês estivessem a andar a centenas de km/h, a luz iria

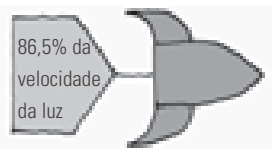
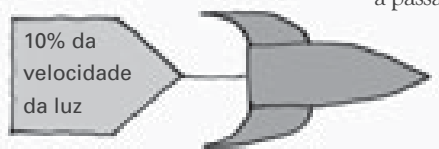
1971

A dilatação do tempo é demonstrada através de relógios colocados em aviões em voo

continuar a mover-se à mesma velocidade. É exactamente 300 milhões de metros por segundo, quer vocês estejam a acender uma lanterna do vosso assento num avião a jacto ou do selim de uma bicicleta.

Era esta velocidade da luz fixa que intrigava Albert Einstein em 1905, levando-o a conceber a sua teoria da relatividade restrita. Na altura secretário de patentes desconhecido na Suíça, Einstein deduziu as suas equações do nada nos seus tempos livres. A relatividade restrita foi o maior desenvolvimento científico desde os tempos de Newton, e revolucionou a física. Einstein começou com a hipótese de a velocidade da luz ter um valor constante, e parecer ser a mesma para qualquer observador, não importando o quão rapidamente ele pudesse estar a mover-se. Se a velocidade da luz não muda, raciocinou Einstein, algo mais tem de mudar para compensar.

Espaço e tempo Seguindo ideias desenvolvidas por Edward Lorenz, George Fitzgerald e Henri Poincaré, Einstein demonstrou que o espaço e o tempo têm de distorcer-se para acomodarem os pontos de vista diferentes de observadores a moverem-se a velocidades próximas da da luz. As três dimensões do espaço e a única do tempo compunham um mundo quadri-dimensional no qual trabalhava a imaginação prodigiosa de Einstein. A velocidade é a distância dividida pelo tempo, logo, para garantir que nada exceda a velocidade da luz as distâncias têm de encolher e o tempo desacelerar para compensar. E por isso um foguetão a mover-se para longe de vocês quase à velocidade da luz vai parecer ser mais curto, e sente o tempo a passar de maneira mais lenta do que vocês.



Einstein conseguiu mostrar que as leis do movimento podiam ser reescritas para observadores a moverem-se a velocidades diferentes. Ele excluiu a possibilidade de um referencial estacionário, como o éter, e declarou que o movimento era todo relativo, sem nenhum ponto de vista privilegiado. Se vocês estão sentados num comboio e vêem outro ao pé do vosso começar a mexer-se, acontece muitas vezes que vocês não saibam se é o vosso comboio ou o outro que está a mover-se. Mais ainda, mesmo que se apercebam que é o vosso comboio

que está estacionário no cais, não poderão concluir que estão imóveis, só poderão concluir que não se estão a mover relativamente a esse cais. Nós não sentimos o movimento da Terra em redor do Sol; e, da mesma maneira, nunca notamos o percurso do Sol através da nossa galáxia, ou o da Via Láctea enquanto ela está a ser puxada em direcção ao enorme aglomerado de galáxias Virgo. Tudo aquilo que sentimos são movimentos relativos, entre vocês e o cais ou a Terra a rodar contra as estrelas.

Einstein chamou a estes pontos de vista diferentes referenciais inerciais. Os referenciais inerciais são espaços que se movem a velocidade constante uns relativamente aos outros, sem

serem sujeitos a acelerações ou a forças. Logo, quando vocês estão sentados num carro a andar a 50 km/h, estão num referencial inercial, e sentem exactamente o mesmo que se estivessem num comboio a andar a 100 km/h (outro referencial inercial) ou num avião a jacto a andar a 500 km/h (e mais outro). Einstein afirmou que as leis da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais. Se vocês deixassem cair uma caneta no carro, no comboio ou no avião, ela ia cair para o chão sempre da mesma forma.

Mais lento e mais pesado Einstein dedicou-se depois a compreender os movimentos relativos próximos da velocidade da luz, que é a velocidade máxima que a matéria pode (quase) alcançar. E previu que o tempo iria correr mais lentamente. A dilatação do tempo exprime o facto de que relógios em referenciais inerciais em movimento diferentes poderão funcionar a ritmos diferentes. Isto veio a ser provado em 1971, mandando quatro relógios atómicos idênticos em voos comerciais de volta ao mundo, dois a voarem para leste e dois para oeste. Comparando os tempos nesses relógios com um do mesmo tipo que tinha ficado na superfície da Terra, os relógios em movimento tinham, cada um, perdido uma fracção de segundo comparados com o relógio em terra, confirmando a teoria da relatividade restrita de Einstein.

Outra razão pela qual os objectos são impedidos de superarem a barreira da velocidade da luz é que a sua massa cresce, de acordo com $E=mc^2$. Um objecto tornar-se-ia infinitamente maior se estivesse a andar exactamente à velocidade da luz, o que tornaria impossível qualquer aceleração adicional. E nada que tenha massa pode chegar exactamente à velocidade da luz, só pode aproximar-se dela, porque quanto mais se aproxima mais pesado se torna e portanto mais difícil de acelerar. A luz é feita de fotões sem massa, por isso eles não são afectados.

A relatividade restrita de Einstein foi um corte radical com aquilo que se tinha feito até então. A equivalência da massa e da energia era chocante, tal como todas as implicações para a dilatação do tempo e a massa. Embora Einstein fosse um zé-ninguém científico quando a publicou, as suas ideias foram lidas por Max Planck, e é talvez devido à sua adopção das ideias de Einstein que elas se tornaram aceites e não desprezadas. Planck viu a beleza das equações de Einstein, o que o catapultou para a fama global.

“É impossível andarmos mais rápido que a velocidade da luz, e de certeza que não é desejável fazê-lo, porque o nosso chapéu vai estar sempre a voar da cabeça.”

Woody Allen

a ideia resumida

O movimento é relativo

41 A relatividade geral

Ao incorporar a gravidade na sua teoria da relatividade restrita, a teoria da relatividade geral de Einstein revolucionou a forma como olhamos para o espaço e para o tempo. Indo para lá das leis de Newton, ela revelou um universo de buracos negros, buracos de verme e lentes gravitacionais.

Imaginem uma pessoa a pular de um edifício muito alto, ou a lançar-se de pára-quedas de um avião, e a cair, acelerando em direcção ao chão devido à acção da gravidade. Albert Einstein deu-se conta de que neste estado de queda livre as pessoas não sentem a gravidade. Por outras palavras, elas encontram-se desprovidas de peso. Hoje em dia, os astronautas em treino recriam as condições de gravidade zero do espaço precisamente desta maneira, embarcando a bordo de um avião de passageiros (agradavelmente baptizado de cometa do vômito), que segue uma trajectória que imita uma montanha russa. Quando o avião voa para cima, os passageiros ficam colados aos assentos, por estarem a sofrer forças de gravidade ainda maiores que o peso. Mas quando o avião se endireita e cai a pique, os passageiros ficam livres da atracção da gravidade e podem flutuar dentro da aeronave.

Aceleração Einstein deu-se conta que esta aceleração era equivalente à força da gravidade. Logo, tal como a relatividade restrita descreve o que acontece em referenciais especiais, chamados referenciais de inércia, que se estão a mover a velocidade constante uns relativamente aos outros, a gravidade era uma consequência de estar num referencial que se estava a acelerar. Ele chamou a isto o pensamento mais feliz da sua vida.

Cronologia

1687 D.C.

Newton propõe a sua lei da gravitação

1915

Einstein propõe a teoria da relatividade geral

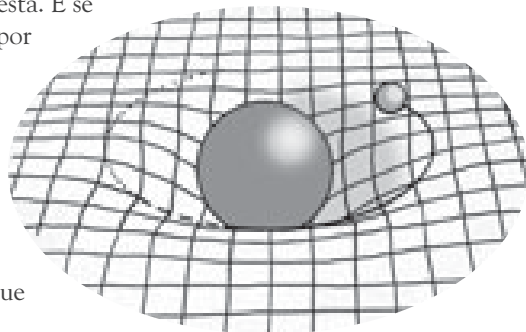
“O tempo e o espaço e a gravitação não têm uma existência separada da matéria.”

Albert Einstein, 1915

Ao longo dos anos que se seguiram, Einstein explorou as consequências desta ideia. Discutindo as suas ideias com colegas em que confiava e usando os formalismos matemáticos mais recentes, ele construiu a teoria completa da gravidade, a que chamou relatividade geral. O ano de 1915, em que publicou o seu trabalho, revelou-se especialmente atarefado e, quase imediatamente a seguir, ele reviu-o várias vezes. Os seus pares estavam espantados com os progressos que ele fazia. A teoria até produziu previsões testáveis muito esquisitas, incluindo a ideia de que a luz poderia ser dobrada por um campo gravitacional e também que a órbita elíptica de Mercúrio devia rodar lentamente, devido à gravidade do Sol.

Espaço-tempo Na relatividade geral, as três dimensões do espaço e a única do tempo combinam-se entre si para formarem uma rede quadri-dimensional, a que se chama métrica. A velocidade da luz continua a estar fixa, e nada pode excedê-la. Quando algo se move e acelera, é esta métrica do espaço-tempo que se distorce e mantém fixa a velocidade da luz.

A melhor forma de pensar na relatividade geral é imaginar que o espaço-tempo é uma folha de borracha que está esticada por cima do tampo de uma mesa, com um buraco no centro. Os objectos com massa comportam-se como bolas pesadas que puséssemos em cima da folha. Eles obrigam o espaço-tempo a encurvar-se em redor de si, tal como a bola forma uma depressão no plano de borracha onde está. E se vocês lançarem uma bola pequena, a representar por exemplo um asteróide, ela iria rolar e cair em direcção à bola central mais pesada, como o asteróide a cair para a Terra. Isto mostra a forma como ele sente a gravidade. Se a bola mais pequena se estivesse a mover suficientemente depressa e se a depressão causada pela bola maior fosse profunda o suficiente, então, da mesma forma que um acrobata com uma bicicleta consegue

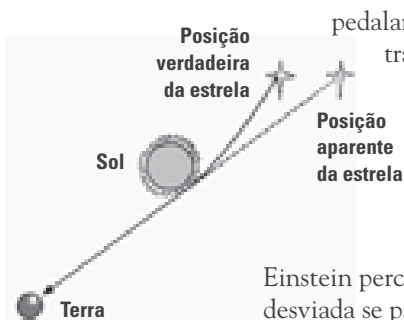


1919

Observações num eclipse verificam a teoria de Einstein

Década de 1960

É observada no espaço evidência de buracos negros



pedalar numa pista muito inclinada, a bola iria descrever uma trajectória parecida com a órbita da Lua. Podemos pensar no universo inteiro como sendo uma folha de borracha gigantesca. Todas as estrelas, todos os planetas e todas as galáxias causam uma depressão que pode atrair ou deflectir objectos mais pequenos que passem por si, como as bolas a rolar nos relevos de um campo de golfe.

Einstein percebeu que, devido a esta distorção do espaço-tempo, a luz seria desviada se passasse próxima de um corpo com muita massa, como o Sol. Ele previu que a posição de uma estrela observada mesmo por trás do Sol iria desviar-se um pouco porque a luz que ela emitisse seria «dobrada» por estar a passar próximo da massa do Sol. Em 29 de Maio de 1919, os astrónomos de todo o mundo reuniram-se para testar as previsões de Einstein, observando um eclipse total do Sol. Esse veio a revelar-se um dos melhores momentos de Einstein, demonstrando que a teoria que algumas pessoas acreditavam ser uma loucura estava na verdade de acordo com as observações.

Distorções e buracos O desvio dos raios de luz já foi confirmado com luz que atravessou o universo inteiro. A luz de galáxias muito distantes dobra-se de uma forma muito clara quando passa por uma região de massa muito grande, como por exemplo um aglomerado gigante de galáxias, ou uma galáxia mesmo grande. O ponto de luz da galáxia em fundo fica

Ondas gravitacionais

Uma outra característica da relatividade geral é a possibilidade de que se possam estabelecer ondas na folha do espaço-tempo. É possível emitir ondas gravitacionais a partir de buracos negros e estrelas compactas muito densas e em rotação, como os pulsares. Os astrónomos observaram a rotação dos pulsares a diminuir, e acreditam que esta energia se perdeu devido às ondas de gravidade, mas essas ondas ainda não foram observadas directamente. Os físicos estão a construir detectores gigantes na Terra e no espaço, que procuram pelo baloiçar previsto pela teoria de feixes laser extraordinariamente compridos para detectar ondas gravitacionais que passem por nós. Se as ondas de gravidade forem detectadas, isso seria outro golpe a favor da teoria da relatividade geral de Einstein.

“Assumiremos portanto a completa equivalência física de um campo gravitacional e da aceleração correspondente do referencial. Esta hipótese estende o princípio da relatividade ao caso do movimento uniformemente acelerado do referencial.”

Albert Einstein, 1907

borrado e forma um arco. Como isto é o mesmo que acontece numa lente, este efeito foi baptizado de lente gravitacional. Se a galáxia em fundo estiver mesmo por trás do objecto pesado que está no meio, a sua luz é distorcida e forma uma circunferência completa, a que se chama um anel de Einstein. Há muitas fotografias lindíssimas deste espectáculo, tiradas pelo telescópio espacial Hubble.

A teoria da relatividade geral de Einstein é, hoje em dia, amplamente aplicada a modelos do universo inteiro. Pode pensar-se no espaço-tempo como sendo uma paisagem, com colinas, vales e buracos. A relatividade geral sobreviveu a todos os testes observacionais que foram feitos até hoje. As regiões onde ela é mais testada são aquelas em que a gravidade é extremamente forte, ou talvez muito fraca.

Os buracos negros (ver a página 168) são poços extremamente profundos na folha do espaço-tempo. São tão fundos e inclinados que qualquer coisa que se aproxime o suficiente deles pode cair lá para dentro e não conseguir sair, até a luz. Eles assinalam buracos, ou singularidades, no espaço-tempo. O espaço-tempo também pode deformar-se para originar buracos de verme, ou tubos, mas até agora ninguém conseguiu ver nada do género.

No outro extremo da escala, em que a gravidade é muito fraca, poderia esperar-se que ela se viesse eventualmente a decompor em pequenos quanta, semelhantes à luz, que é composta por imensos blocos individuais, os fôtons. Mas nunca alguém observou qualquer tipo de granularidade na gravidade. Estão a desenvolver-se teorias quânticas da gravidade mas, sem evidências experimentais que as comprovem, a unificação entre a teoria quântica e a gravidade continua a fugir-nos. A esperança de alcançar essa unificação ocupou Einstein durante o resto da sua carreira, mas ele não conseguiu, e o desafio continua presente.

a ideia resumida
Espaço distorcido

42 Buracos negros

Cair para um buraco negro não seria nada agradável, porque os vossos membros seriam destroçados e vocês pareceriam estar imobilizados no tempo, no instante em que começassem a cair, para todos os vossos amigos. Os buracos negros foram inicialmente concebidos como estrelas congeladas, cuja velocidade de escape excedia a da luz, mas hoje em dia são considerados como buracos ou «singularidades» na folha do espaço-tempo de Einstein. Não são só estruturas imaginárias, os buracos negros gigantes povoam os centros das galáxias, até o centro da nossa, e os mais pequenos aparecem aqui e ali no espaço, como fantasmas de estrelas mortas.

Se atirarem uma bola ao ar, ela atinge uma certa altura e depois começa a cair. Quanto mais depressa a lançarem mais alto ela sobe. Se a atirassem

«Deus não só joga aos dados, como às vezes joga onde ninguém os pode ver.»

Stephen Hawking, 1977

com força suficiente, ela iria escapar à gravidade da Terra e sairia disparada pelo espaço fora. A velocidade que é necessária para isso acontecer, chamada de «velocidade de escape», é de 11 km/s (ou cerca de 40 000 km/h). Um foguetão precisa de atingir essa velocidade para conseguir escapar à Terra.

A velocidade de escape é mais pequena se vocês estiverem à superfície da Lua, que é menor: bastariam uns 2,4 km/s. Mas se vocês estiverem num planeta com massa suficiente, a velocidade de escape aumenta e poderia atingir ou até exceder a própria velocidade da luz, e nessa altura nem sequer a luz conseguiria escapar à sua atracção gravitacional. Um objecto desses, que tem tanta massa e é tão denso que nem sequer a luz consegue escapar dele, chama-se um buraco negro.

Cronologia

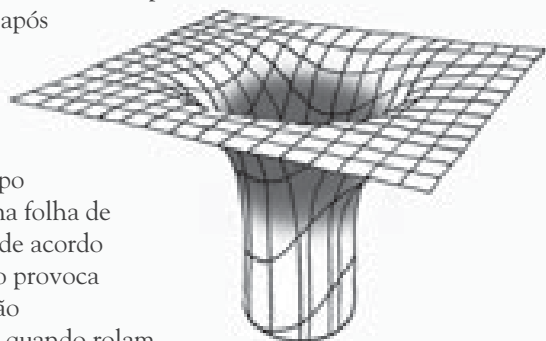
1784 D.C.

Michell deduz a possibilidade de existência de «estrelas escuras»

Anos 1930

Prevê-se a existência de estrelas congeladas

Horizonte de acontecimentos A ideia dos buracos negros foi desenvolvida no século XVIII pelo geólogo John Michell e pelo matemático Pierre-Simon Laplace. Mais tarde, após Einstein ter proposto as suas teorias da relatividade, Karl Schwarzschild fez os cálculos que mostravam como é que um buraco negro se comportaria. Na teoria da relatividade geral de Einstein, o espaço e o tempo estão ligados entre si, e comportam-se como uma folha de borracha enorme. A gravidade distorce a folha de acordo com a massa de um objecto. Um planeta pesado provoca uma depressão no espaço-tempo, e a sua atracção gravitacional é equivalente à força que se sente quando rolam pela depressão abaixo, o que irá distorcer a vossa trajectória ou talvez até fazer-vos entrar em órbita.



Então o que é um buraco negro? Seria um poço tão profundo e tão inclinado que tudo aquilo que se aproxima o suficiente cai lá para dentro e não consegue sair. É um buraco na folha do espaço-tempo, como uma rede de basquete (da qual nunca iremos conseguir recuperar a bola).

Se vocês passarem longe de um buraco negro, a vossa trajectória poderia encurvar-se em direcção a ele, mas não seria obrigatório que caíssem lá para dentro. Mas se passarem demasiado próximos, caem de certeza. É a mesma coisa que aconteceria a um fotão de luz. A distância crítica que separa estes dois resultados chama-se o «horizonte de acontecimentos». Tudo aquilo que cai para dentro do horizonte de acontecimentos despenha-se para o buraco negro, até a luz.

Cair para dentro de um buraco negro tem sido descrito como estar-se a ser «espaguetificado». Como os lados do buraco negro são tão inclinados, existe um gradiente de gravidade muito forte dentro dele. Se vocês caíssem para um buraco negro com os pés para a frente, os vossos pés seriam atraídos mais fortemente do que a vossa cabeça, e o vosso corpo seria todo esticado, como se estivessem numa mesa de torturas medieval. Adicionem a isso um qualquer movimento de rotação e vocês seriam esticados como uma pastilha elástica até formarem uma

1965

Descobrem-se os quasares

1967

Wheeler rebaptiza as estrelas congeladas, chamando-as de buracos negros

Anos 1970

Hawking propõe que os buracos negros possam evaporar

Evaporação

Por mais estranho que possa parecer, os buracos negros acabam por se evaporar. Nos anos 1970, Stephen Hawking sugeriu que os buracos negros não são completamente negros por radiarem partículas devido a efeitos quânticos. A massa perde-se gradualmente desta forma, e devido a isso o buraco negro encolhe até desaparecer. A energia do buraco negro cria continuamente pares de partículas e as suas antipartículas correspondentes. Se isto acontece próximo do horizonte de acontecimentos, algumas vezes uma das

partículas pode escapar enquanto a outra cai lá para dentro. Para um observador exterior, o buraco negro parece estar a emitir partículas, a que se chama radiação de Hawking. Esta energia emitida faz com que o buraco diminua de tamanho. Esta ideia por enquanto baseia-se apenas em teorias, e ninguém sabe ao certo o que acontece a um buraco negro. O facto de eles serem relativamente comuns sugere que este processo demora um tempo muito longo, e por isso os buracos negros andam por aí.

tira de esparguete. Não é uma forma muito agradável de morrer. Alguns cientistas preocuparam-se em tentar proteger um pobre infeliz que caísse acidentalmente para um buraco negro. Uma forma de se protegerem seria, aparentemente, carregar um anel de chumbo salvavidas. Se o anel for pesado e denso o suficiente, ele iria contrariar o gradiente de gravidade e preservar a vossa forma, e a vossa vida.

Estrelas congeladas O nome «buraco negro» foi inventado em 1967 por John Wheeler, uma alternativa mais engraçada para descrever uma estrela congelada. As estrelas congeladas tinham sido previstas nos anos 1930 pelas teorias de Einstein e Schwarzschild. Devido ao estranhíssimo comportamento do espaço e do tempo próximo do horizonte de acontecimentos, a matéria luminosa que estivesse a cair para um buraco negro iria aparentar estar a andar cada vez mais devagar à medida que caía, devido às ondas de luz demorarem cada vez mais tempo a chegar até um observador exterior. Se esse observador exterior atravessar o horizonte de acontecimentos, ele veria o tempo a parar de facto, de forma que o material em queda pareceria estar congelado no instante em que atravessa o horizonte. Daí a previsão de estrelas congeladas, imobilizadas no tempo precisamente no instante em que colapsaram para o horizonte de acontecimentos. O astrofísico Subrahmanyan Chandrasekhar previu que estrelas com mais do que 1,4 vezes a massa do Sol iriam, em última análise, colapsar sobre si mesmas e formar um buraco negro; no entanto, devido ao princípio da exclusão de Pauli (ver a página 120), ficámos a saber que as anãs brancas e as estrelas de neutrões conseguem aguentar-se graças à pressão quântica, por isso os buracos negros precisam de mais do que 3 vezes a massa

do Sol para se formarem. Foi só nos anos 1960 que se descobriram evidências da existência destas estrelas congeladas ou buracos negros.

Se os buracos negros sugam a luz, como é conseguimos vê-los? Há duas maneiras. Primeiro, é possível dar por eles por causa da forma como puxam outros objectos para si. E segundo, à medida que o gás cai para um buraco negro ele vai aquecer e brilhar antes de desaparecer. O primeiro método tem sido utilizado para identificar o buraco negro escondido no centro da nossa própria galáxia. Vê-se que as estrelas que passam próximo desse buraco negro são muito aceleradas e saem disparadas em órbitas muito alongadas. O buraco negro da Via Láctea tem uma massa de um milhão de sóis, esmagados numa região com um raio de apenas 10 milhões de quilómetros (30 segundos-luz). Os buracos negros dos centros das galáxias são tão grandes que lhes chamam buracos negros supermassivos. Não sabemos como é que se formaram, mas parecem afectar a formação das galáxias, pelo que é bem possível que tenham lá estado desde o início ou, talvez, se tenham formado a partir do colapso de milhões de estrelas para um único ponto.

“Os buracos negros são os objectos macroscópicos mais perfeitos que existem no universo: os únicos elementos da sua construção são os nossos conceitos de espaço e de tempo.”

**Subrahmanyan Chandrasekhar,
1983**

A segunda maneira de ver um buraco negro é pela luz que provém do gás aquecido enquanto cai para o seu centro. Os quasares, que são as coisas mais luminosas do universo, brilham graças ao gás que está a ser sugado para buracos negros supermassivos nos centros de galáxias distantes. Buracos negros mais pequenos, só com umas poucas massas solares, também podem ser identificados pelos raios X que saem disparados do gás que cai para dentro deles.

Buracos de verme O que é que está no fundo de um buraco negro na folha do espaço-tempo? Supostamente, eles acabam num ponto bem definido, ou então são mesmo buracos, furos na folha. Mas os teóricos têm pensado no que poderia acontecer se eles se juntassem a outro buraco. Pensem em dois buracos negros próximos um do outro como tubos grandes, pendurados da folha do espaço-tempo. Se esses tubos se juntassem um ao outro, então isso seria um tubo, ou buraco de verme, formado entre as duas aberturas dos buracos negros. Munidos do vosso «salva-vidas», vocês poderiam saltar para dentro de um dos buracos negros e sair no outro. Esta ideia tem sido muito utilizada em ficção científica para transporte através do tempo e do espaço.

a ideia resumida
Armadilhas para a luz

43 O paradoxo de Olbers

Porque é que o céu é escuro à noite? Se o universo fosse infinito e tivesse existido desde sempre, então ele deveria ser tão brilhante quanto o Sol, e no entanto não é isso que acontece. Ao olharem para o céu nocturno, vocês estão a ver toda a história do universo. O número limitado de estrelas é real e implica que o universo tem um tamanho e idade limitados. O paradoxo de Olbers desbastou a trilha para a cosmologia moderna e para o modelo do *big bang*.

Vocês poderiam achar que mapear o universo todo e observar a sua história seria algo muito difícil e que precisariam, para o fazer, de satélites caros no espaço, telescópios enormes no topo de montanhas longínquas ou de uma cabeça como a de Einstein. Mas, na realidade, se saírem de casa numa noite com céu limpo, podem fazer uma observação que é tão profunda quanto a relatividade geral: à noite, o céu é escuro. Embora tomemos isto como um dado adquirido, o facto de o céu ser escuro, e não tão brilhante quanto o Sol, diz-nos muito acerca do universo.

A luz das estrelas Se o universo fosse infinitamente grande, estendendo-se indefinidamente em todas as direcções, então em todas as direcções para as quais olhássemos veríamos, eventualmente, uma estrela. Todos os sítios para onde olhássemos terminariam na superfície de uma estrela. Afastando-nos mais e mais da Terra, o espaço estaria preenchido por cada vez mais estrelas. É como olhar para uma floresta cheia de árvores – quando estão próximos, vocês conseguem distinguir troncos individuais,

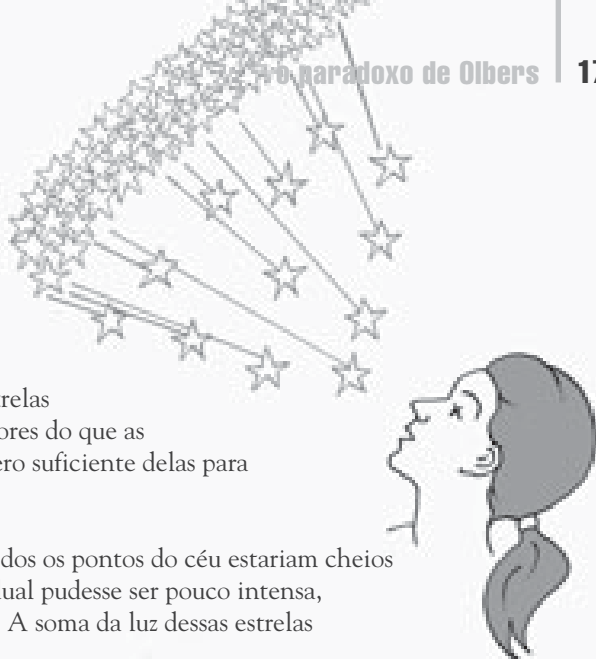
Cronologia

1610 D.C.

Kepler anota que o céu nocturno é escuro

que parecem ser tanto maiores quanto mais próximos estão, mas a vossa visão também está preenchida por árvores mais distantes. Então, se a floresta fosse realmente grande, vocês não seriam capazes de ver a paisagem por trás dela. É isto que aconteceria se o universo fosse infinitamente grande. Embora as estrelas estejam espaçadas a distâncias muito maiores do que as árvores, eventualmente haveria um número suficiente delas para bloquear por completo a nossa visão.

Se todas as estrelas fossem como o Sol, todos os pontos do céu estariam cheios de luz estelar. Embora uma estrela individual pudesse ser pouco intensa, existiriam outras estrelas a essa distância. A soma da luz dessas estrelas



Céus escuros

A beleza do céu noturno escuro está a tornar-se cada vez mais difícil de ver devido ao brilho das luzes das nossas cidades. Ao longo da história, as pessoas foram capazes de, em noites claras, olhar para cima e ver uma espinha dorsal de estrelas bem iluminada a espalhar-se pelo céu inteiro. Chamou-se-lhe a Via Láctea, e hoje sabemos que quando a contemplamos estamos a olhar para o plano central da nossa galáxia. Mesmo nas grandes cidades, era possível, há 50 anos, ver as estrelas mais brilhantes e o rasto da Via Láctea, mas hoje em dia quase nenhuma estrela são visíveis em cidades, e

mesmo no campo as vistas dos céus estão obstruídas por uma névoa amarelada. As vistas que inspiraram gerações inteiras antes de nós estão a ficar toldadas. As luzes de sódio da iluminação pública são as principais culpadas, sobretudo as que desperdiçam luz apontando para cima e não só para baixo. Há grupos pelo mundo fora, como a associação Internacional dos Céus Escuros, que inclui muitos astrónomos, a desenvolver campanhas para se imporem limites à poluição luminosa, para que a nossa vista do universo seja preservada.

1832

Olbers formula o paradoxo que é baptizado com o seu nome

1912

Vesto Slipher mede os desvios para o vermelho das galáxias

Eureka!

No seu poema em prosa *Eureka*, de 1848, Edgar Allan Poe observou que:

«Fosse a sucessão de estrelas interminável, então o pano de fundo do céu apresentar-nos-ia uma luminosidade uniforme, como aquela exibida pela galáxia – visto que não poderia haver nenhum ponto, em todo esse fundo, no qual não existisse uma estrela. A única maneira, portanto, segundo a qual, perante tal estado das coisas, poderíamos compreender os vazios que os nossos telescópios encontram em direcções inumeráveis, seria supor que a distância ao fundo invisível é tão imensa que nenhum raio dele foi até agora capaz de nos alcançar.»

providenciaria um brilho igual ao do Sol, e por isso o céu nocturno deveria ser tão brilhante quanto o Sol.

Obviamente não é isso que sucede. O paradoxo do céu escuro à noite foi notado por Johannes Kepler no século XVII, mas só foi formulado em 1823 pelo astrónomo alemão Heinrich Olbers. As soluções do paradoxo têm implicações profundas. Há várias explicações, e cada uma delas tem elementos verdadeiros que são compreendidos e adoptados pelos astrónomos modernos. Mesmo assim, é incrível que uma observação tão simples nos possa dizer tanta coisa.

O fim à vista A primeira explicação é que o universo não é infinitamente grande. Ele tem de acabar num sítio qualquer. Por isso, tem de haver um número limitado de estrelas no universo, e não encontramos estrelas em todas as direcções para as quais olhamos. Analogamente, quando estamos próximos da borda da floresta, ou num bosque pequeno, podemos ver o céu para lá das árvores.

Outra explicação poderia ser que o número de estrelas mais distantes é menor, e por isso elas não dão, no seu conjunto, tanta luz quanto as outras. Como a luz viaja a uma velocidade bem precisa, a luz das estrelas distantes demora mais tempo a chegar até nós do que a das estrelas mais próximas. A luz do Sol demora 8 minutos para chegar até nós, mas a luz da estrela mais próxima, Alfa Centauro, demora 4 anos a chegar, e para as estrelas do outro lado da nossa galáxia esse tempo chega aos 100 mil anos. A luz da galáxia mais próxima, Andrómeda, demora 2 milhões de anos a chegar até nós; é o objecto mais distante que conseguimos ver a olho nu. Logo, à medida que espreitamos para mais longe no universo, olhamos para trás no tempo, e as estrelas parecem ser mais jovens do que as que estão mais próximas. Isto poderia

ajudar-nos com o paradoxo de Olbers, se na nossa vizinhança essas estrelas jovens se tornarem eventualmente mais raras do que as estrelas como o Sol. As estrelas como o Sol vivem cerca de 10 mil milhões de anos (estrelas maiores têm vidas mais curtas, e estrelas menores vidas maiores), por isso o facto de as estrelas terem uma vida finita também poderia ajudar a explicar o paradoxo. As estrelas deixam de existir antes de um certo período porque ainda não nasceram. Ou seja, as estrelas não existiram desde sempre. Fazer com que as estrelas fiquem mais fracas que o Sol também é possível graças ao desvio para o vermelho. A expansão do universo estica os comprimentos de onda da luz, o que faz com que a luz das estrelas mais distantes pareça ficar mais avermelhada. Portanto, as estrelas muito longínquas parecerão ser um pouco mais frias do que as estrelas mais próximas. Isto poderia também restringir a quantidade de luz que nos chega das regiões mais afastadas do universo.

Já foram propostas ideias ainda mais loucas, como por exemplo a luz vinda de grandes distâncias ser bloqueada, por fuligem de civilizações extraterrestres, agulhas de ferro ou uma poeira cinzenta esquisita. Mas qualquer luz absorvida seria reemitida sob a forma de calor, e por isso daríamos por ela algures noutra parte do espectro. Os astrónomos já verificaram a luz do céu nocturno em todos os comprimentos de onda, desde as ondas de rádio até aos raios gama, e ainda não viram nenhum sinal de que a luz visível das estrelas esteja a ser bloqueada.

Um universo a meio caminho A simples observação de que o céu é escuro à noite diz-nos que o universo não é infinito. Ele só existiu durante um intervalo limitado de tempo, tem um tamanho finito e as estrelas que nele estão não existiram desde sempre.

A cosmologia moderna baseia-se nestas ideias. As estrelas mais antigas que vemos têm cerca de 13 mil milhões de anos, por isso sabemos que o universo deve-se ter formado antes dessa altura. O paradoxo de Olbers sugere que não poderá ter sido muito antes disso, ou esperaríamos ver muitas gerações de estrelas mais antigas, o que não acontece.

As estrelas de galáxias mais distantes são de facto mais vermelhas do que as mais próximas, devido ao desvio para o vermelho, o que faz com que seja mais difícil de vê-las com telescópios ópticos, confirmando que o universo se está a expandir. As galáxias mais distantes que se conhecem hoje em dia são tão vermelhas que se tornam invisíveis, e só podem ser captadas nos comprimentos de onda do infravermelho. De forma que todas estas evidências estão de acordo com a ideia de que o universo nasceu a partir de uma enorme explosão há cerca de 14 mil milhões de anos.

a ideia resumida

O nosso universo finito

44 A lei de Hubble

Edwin Hubble foi o primeiro a dar-se conta de que as galáxias para lá da nossa se estão todas a afastar de nós. Quanto mais longe elas estão, mais rápido se afastam, obedecendo à lei de Hubble. Esta diáspora galáctica constituiu a primeira prova de que o universo se está a expandir, uma descoberta espantosa que mudou a nossa perspectiva acerca do universo como um todo, e do seu destino.

6 A história da astronomia é a história do recuo dos horizontes. 9

Edwin Hubble, 1938

A dedução de Copérnico, no século XVI, de que a Terra girava em torno do Sol, causou imensa polémica. Os humanos já não habitavam no centro exacto do cosmos. Mas nos anos 1920 o astrónomo americano Edwin

Hubble fez medições com telescópios com resultados que eram ainda mais estarrecedores. Ele mostrou que o universo não era estático, mas que se estava a expandir. Hubble catalogou as distâncias de outras galáxias à Via Láctea, e as respectivas velocidades relativamente à nossa galáxia; e descobriu que todas as outras galáxias se estavam a afastar de nós. Éramos tão cosmicamente impopulares que só uns poucos vizinhos próximos se estavam a aproximar de nós. Quanto mais distante a galáxia, mais depressa ela se afastava, com uma velocidade proporcional à distância a que ela se encontrava (lei de Hubble). A razão entre a velocidade e a distância é sempre o mesmo número, para todas as galáxias, número esse a que se chama constante de Hubble. Os astrónomos já conseguiram medir o seu valor, de cerca de 75 quilómetros por segundo por megaparsec (um megaparsec, ou milhão de parsecs, é equivalente a 3 262 000 anos luz, ou cerca de 3×10^{22} m). Portanto, as galáxias estão continuamente a afastar-se de nós, com esta velocidade.

Cronologia

1918 D.C.

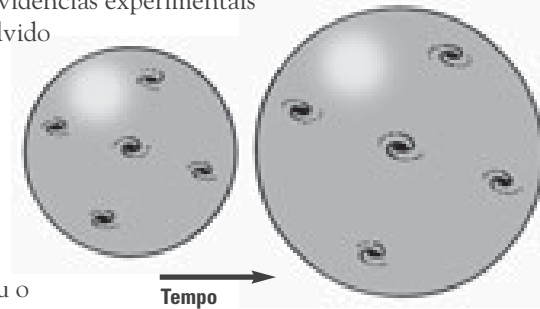
Vesto Slipher mede os desvios para o vermelho das nebulosas

1920

Shapley e Curtis debatem o tamanho da Via Láctea

O grande debate Antes do século XX os astrónomos quase nem percebiam a nossa própria galáxia, a Via Láctea. Tinham medido centenas de estrelas dentro dela, mas tinham também reparado que ela parecia estar repleta de muitos borrões pouco nítidos, a que chamavam nebulosas. Algumas dessas nebulosas eram nuvens gasosas associadas aos nascimentos e mortes de estrelas. Mas outras pareciam ser diferentes. Algumas tinham formas em espiral ou oval, que sugeriam serem mais regulares do que uma nuvem.

Em 1920, dois astrónomos entraram num debate acerca da origem destes borrões. Harlow Shapley defendeu que tudo o que existia no céu era parte da Via Láctea, que constituía a totalidade do universo. Por outro lado, Heber Curtis propunha que algumas destas nebulosas eram «universos ilha» separados, ou «universos» externos à nossa Via Láctea. A palavra «galáxia» só foi inventada mais tarde para descrever estes universos nebulosos. Ambos os astrónomos baseavam-se em evidências experimentais para apoiarem as suas ideias, e o debate não foi resolvido naquela altura. O trabalho posterior de Hubble mostrou que o ponto de vista de Curtis estava correcto. Aquelas nebulosas em espiral eram galáxias externas e não se encontravam dentro da Via Láctea. O universo tinha, repentinamente, aumentado de tamanho de forma brutal.



A voar em todas as direcções Hubble usou o telescópio Hooker, de 100 polegadas, do observatório do Monte Wilson, para medir a luz de estrelas que piscavam na nebulosa de Andrómeda, que se sabe hoje em dia ser uma galáxia muito parecida com a Via Láctea, sabendo-se igualmente que é uma parente próxima no grupo de galáxias a que estamos associados. Essas estrelas a piscar são as estrelas variáveis Cefeidas, e mesmo hoje continuam a ser sondas de distâncias preciosíssimas. A quantidade e duração das «piscadelas» aumenta com o brilho intrínseco da estrela, de forma que se soubermos como é que a luz varia ficamos a saber o quão brilhante ela é. Conhecendo o seu brilho intrínseco podemos depois calcular quão distante ela está, porque a distância atenua esse brilho. É a mesma coisa que ver uma lâmpada a uma certa distância, sabendo que a sua potência é de 100 Watts, e depois conseguir dizer a que distância ela está comparando o seu brilho com o de uma outra lâmpada de 100 Watts, colocada mesmo ao pé de nós.

1922

Alexander Friedmann publica o modelo do *big bang*

1924

Descoberta das estrelas variáveis Cefeidas

1929

Hubble e Milton Humason descobrem a lei de Hubble

O telescópio espacial Hubble

O Telescópio Espacial Hubble é, sem dúvida, o satélite-observatório mais popular de sempre. As suas espantosas fotografias de nebulosas, galáxias distantes e discos em torno de estrelas agraciaram as páginas de imensos jornais durante quase 20 anos. Lançado em 1990 pelo vaivém espacial *Discovery*, a espaçonave tem mais ou menos o tamanho de um autocarro de dois andares, 13 metros de comprimento, 4 de largura e pesa cerca de 11 000 kg. Tem um telescópio astronómico cujo espelho tem 2,4 m de comprimento e uma série de câmaras e

detectores electrónicos que são capazes de tirar imagens com uma nitidez cristalina, na luz visível, ultravioleta e infravermelha.

O poder do Hubble reside no facto de estar localizado acima da atmosfera – de forma que as suas fotografias não ficam borradas. O Hubble está agora a ficar velho, e o seu destino é incerto. A NASA pode actualizar os seus instrumentos, mas isso precisaria de uma missão tripulada do vaivém, ou pode decidir acabar com o programa e resgatar a nave para a posteridade ou fazê-la cair em segurança sobre o oceano.

Hubble conseguiu desta maneira medir a distância à galáxia de Andrómeda. Ela estava a uma distância muito maior do que o tamanho da

“Descobrimo-las cada vez mais pequenas e menos intensas, em números cada vez maiores, e sabemos que estamos a progredir no espaço, mais e mais longe, até que, na nebulosa mais ténue que possa ser detectada com os maiores telescópios, chegamos à fronteira do universo conhecido.”

Edwin Hubble, 1938

nossa Via Láctea, que tinha sido medido por Shapley, o que implicava que tinha de estar fora dela. Este simples facto era revolucionário. Significava que o nosso universo era vasto, e repleto de outras galáxias como a Via Láctea.

Hubble começou então a medir distâncias a muitas outras galáxias. Descobriu que a luz que provinha delas estava, na maior parte dos casos, desviada para o vermelho, com um desvio que crescia com a distância. O desvio para o vermelho é parecido com o desvio de Doppler de um objecto em movimento (ver a página 76). Descobrir que as frequências da luz, como por exemplo as transições atómicas do hidrogénio, eram todas mais vermelhas do que o esperado significava que estas galáxias estavam todas a afastar-se de nós, como uma frota de ambulâncias cujas sirenes se tornam mais graves à medida que se afastam. Era muito estranho que

todas as galáxias se estivessem a afastar, e que só as «locais» se estivessem a mover em nossa direcção. Quanto mais longe se olhava, mais depressa as galáxias se afastavam. Hubble viu que as galáxias não se estavam pura e simplesmente a afastar de nós, o que teria tornado o nosso lugar no universo bastante privilegiado. Em vez disso, elas estavam todas a afastar-se entre si. Hubble concluiu que o próprio universo estava a expandir-se, como um balão gigantesco a encher-se. As galáxias são como pontos desenhados no balão, afastando-se uns dos outros à medida que enchamos o balão com mais ar.

Quão longe e quão rápido? Os astrónomos continuam na actualidade a usar as estrelas variáveis Cefeidas para medir a expansão do universo local. Um dos grandes objectivos tem sido medir com precisão a constante de Hubble. Para o conseguir, é preciso saber a que distância está um dado objecto, e qual a sua velocidade ou desvio para o vermelho. Os desvios para o vermelho obtêm-se através de medições triviais dos espectros atómicos. A frequência de uma transição atómica específica na luz estelar pode ser comparada com o seu comprimento de onda conhecido em laboratório; a diferença dá-nos o seu desvio para o vermelho. As distâncias são mais difíceis de determinar, porque é necessário observar algo na galáxia distante do qual ou se conhece o comprimento verdadeiro ou o brilho intrínseco, denominado «vela padrão».

Há uma série de métodos para determinar distâncias astronómicas. As estrelas Cefeidas funcionam bem para galáxias próximas, quando conseguimos distinguir estrelas individuais. Mas quando vamos para mais longe precisamos de outras técnicas. As diferentes técnicas de medição podem ser todas agregadas, uma a uma, para construir uma régua de medida gigantesca, ou «escada de distâncias». Mas como cada método tem as suas peculiaridades, há ainda muitas incertezas acerca da precisão desta régua astronómica.

A constante de Hubble é hoje conhecida com uma precisão de cerca de 10%, graças, em grande medida, às observações de galáxias efectuadas com o Telescópio Espacial Hubble e à radiação cósmica de fundo de microondas. A expansão do universo começou no *big bang*, a explosão que criou o universo, e desde essa altura as galáxias têm andado numa corrida desenfreada. Como o universo está continuamente a expandir-se, se se seguir o percurso dessa expansão para trás pode-se calcular quando é que ela começou. O resultado é cerca de 14 mil milhões de anos. Esta velocidade de expansão, felizmente, não é suficiente para partir o universo. Em vez disso, o cosmos mostra estar num equilíbrio delicado, entre ser completamente despedaçado pela expansão e conter massa suficiente para colapsar sobre si mesmo, eventualmente.

a ideia resumida

O universo em expansão

45 O *big bang*

O nascimento do universo, graças a uma explosão fenomenal, criou todo o espaço, toda a matéria e todo o tempo que nós conhecemos. Previsto graças à matemática da relatividade geral, vemos evidências para o *big bang* na corrida das galáxias para longe da nossa, nas quantidades de elementos leves no universo e no brilho de microondas que preenche o céu.

O *big bang* foi a maior de todas as explosões – o nascimento do universo. Quando olhamos à nossa volta hoje em dia, vemos sinais de que o universo se está a expandir e inferimos daí que ele deve ter sido mais pequeno, e mais quente, algures no passado. Levando este raciocínio à sua conclusão lógica, isto quer dizer que o cosmos todo poderia ter-se originado de um único ponto. No momento da ignição, o espaço e o tempo e a matéria foram todos criados ao mesmo tempo, numa bola de fogo cósmico. De forma muito gradual, ao longo de 14 mil milhões de anos, esta nuvem quente e densa inchou e arrefeceu. Até que acabou por fragmentar-se e produzir as estrelas e galáxias que povoam, hoje em dia, os céus.

Não é uma anedota A expressão «*big bang*» foi na realidade inventada no gozo. O famoso astrónomo britânico Fred Hoyle achava ridículo que todo o universo se tivesse formado a partir de uma única semente. Numa série de palestras na rádio que foram emitidas pela primeira vez em 1949, ele atacou, por achá-la rebuscada, a proposta do matemático belga Georges Lemaître, que tinha descoberto uma dessas soluções nas equações de Einstein da relatividade geral. Em vez disso, Hoyle preferia acreditar numa visão do cosmos mais sustentável. No seu «estado estacionário» perpétuo, a matéria e o espaço estavam continuamente a ser criados e destruídos, e por isso o universo poderia ter existido durante um

Cronologia

1927 D.C.

Friedmann e Lemaître concebem a teoria do *big bang*

1929

Hubble detecta a expansão do universo

tempo ilimitado. Mesmo assim, as pistas em contrário já se estavam a acumular, e por altura dos anos 1960 a perspectiva estática de Hoyle teve de ceder, dada a quantidade de evidências que favoreciam o *big bang*.

O universo em expansão O sucesso do modelo do *big bang* baseia-se em três observações cruciais. A primeira é a observação, por Edwin Hubble nos anos 1920, de que a maior parte das galáxias se está a afastar da nossa. Visto de longe, todas as galáxias tendem a afastar-se entre si, como se o tecido do espaço-tempo se estivesse a expandir e a esticar, obedecendo à lei de Hubble. Uma consequência deste esticamento é que a luz demora um pouco mais a alcançar-nos quando está a atravessar um universo em expansão do que se estivesse a viajar através de um universo em que as distâncias estavam fixas. Este efeito implica um desvio na frequência da luz, a que se chama o «desvio para o vermelho», visto que a luz recebida parece ser mais vermelha do que era quando deixou a estrela ou galáxia distantes. Os desvios para o vermelho podem ser utilizados para se deduzirem distâncias astronómicas.

Elementos leves Viajando para trás no tempo, até às primeiras horas do universo recém-nascido, logo a seguir ao *big bang*, tudo o que existia estava muitíssimo comprimido, num caldeirão superaquecido a ferver. No primeiro segundo, o universo estava tão quente e tão denso que nem sequer os átomos eram estáveis. À medida que foi arrefecendo, emergiu uma sopa de partículas, condimentada inicialmente com quarks, glúões e outras partículas fundamentais (ver a página 144). Passado apenas um minuto, os quarks juntaram-se e formaram prótons e neutrões. Depois, passados os primeiros três minutos, a química cósmica misturou os prótons e os neutrões, de acordo com os seus números relativos, formando núcleos atómicos. É nesta altura que se formaram elementos diferentes do hidrogénio, através da fusão nuclear. Assim que o universo arrefeceu abaixo do limite de fusão, era impossível fazer elementos mais pesados que o berílio. De forma que o universo estava inicialmente num banho de núcleos de hidrogénio, hélio e traços residuais de

“Regulem o vosso televisor num canal qualquer que ele não consiga receber, e cerca de 1% da estática que vêem a dançar no ecrã deve-se a esta relíquia antiga do big bang. Da próxima vez que se queixarem de que não há nada para ver, lembrem-se que podem sempre ver o nascimento do universo.”

Bill Bryson, 2005

1948

A radiação cósmica de fundo de microondas é prevista

A nucleossíntese do *big bang* é calculada por Alpher e Gamow

1949

Hoyle inventa a expressão «*big bang*»

1965

Penzias e Wilson detectam a radiação cósmica de fundo de microondas

1992

O satélite COBE mede irregularidades na radiação cósmica de fundo de microondas

cronologia do big bang

Tempo

13,7 mil milhões de anos [depois do *big bang*]

Hoje em dia (temperatura, $T = 2,726 \text{ K}$)

200 milhões de anos «Reionização»: as primeiras estrelas acendem-se e ionizam o gás de hidrogénio ($T = 50 \text{ K}$)

380 mil anos «Recombinação»: o gás de hidrogénio arrefece e forma moléculas ($T = 3000 \text{ K}$)

10 mil anos Fim da época dominada pela radiação ($T = 12000 \text{ K}$)

1000 segundos Decaimento dos neutrões isolados ($T = 500 \text{ milhões K}$)

180 segundos «Nucleossíntese»: formação do hélio e de outros elementos a partir do hidrogénio ($T = 1000 \text{ milhões K}$)

10 segundos Aniquilação de pares de electrões e positrões ($T = 5000 \text{ milhões K}$)

1 segundo Desacoplamento dos neutrinos ($T \sim 10000 \text{ milhões K}$)

100 microssegundos Aniquilação dos píões ($T \sim 1 \text{ bilião K}$)

50 microssegundos «Transição de fase da QCD»: os quarks ligam-se uns aos outros para formarem neutrões e prótons ($T = 2 \text{ biliões K}$)

10 picossegundos «Transição de fase electrofraca»: as forças electromagnética e fraca tornam-se diferentes ($T \sim 1\text{-}2 \text{ mil biliões K}$)

Antes deste período as temperaturas eram tão elevadas que o nosso conhecimento da física é incerto.

deutério (hidrogénio pesado), lítio e berílio, criados pelo próprio *big bang*.

Nos anos 1940, Ralph Alpher e George Gamow previram as proporções dos elementos leves que tinham sido produzidos no *big bang*, e este cálculo simples tem sido confirmado, mesmo pelas medições mais recentes em estrelas com uma queima muito lenta e em nuvens de gás primitivo na nossa Via Láctea.

Brilho de microondas

Outro pilar de apoio do *big bang* consiste na descoberta, em 1965, de um eco muito fraco do próprio *big bang*. Arno Penzias e Robert Wilson estavam a trabalhar num receptor rádio nos Bell Labs em Nova Jérsei e ficaram intrigados por um sinal de ruído fraco do qual não se conseguiam ver livres. Parecia que havia uma fonte extra de microondas a vir de todas as partes do céu, equivalente a uns poucos graus de temperatura.

Depois de falarem com o astrofísico Robert Dicke na

vizinha Universidade de Princeton, deram-se conta que o sinal estava de acordo com as previsões de um brilho remanescente do *big bang*. Tinham tropeçado na radiação cósmica de fundo de microondas, um mar de fotões que era uma relíquia de um universo jovem muito quente.

Na teoria do *big bang*, a existência do fundo de microondas tinha sido prevista em 1948 por George Gamow, Ralph Alpher e Robert Hermann. Embora os



big bang

núcleos tenham sido sintetizados nos primeiros três minutos, os átomos só se formaram passados 400 000 anos. Eventualmente, electrões carregados negativamente emparelharam-se com núcleos carregados positivamente, formando átomos de hidrogénio e outros elementos leves. A remoção das partículas carregadas, que dispersam a luz e bloqueiam o seu percurso, foi como se o nevoeiro se tivesse dispersado e o universo se tivesse tornado transparente. A partir desse ponto, a luz podia viajar livremente através do universo, o que nos permite, ainda hoje, olhar para esse período.

Embora o nevoeiro do universo jovem fosse originalmente muito quente (uns 3000 Kelvins), a expansão do universo desviou o seu brilho para o vermelho, de forma que aquilo que vemos hoje em dia tem uma temperatura abaixo dos 3 K (três graus acima do zero absoluto). Foi isto que Penzias e Wilson detectaram. Assim, com estas três fundações básicas intactas até agora, a teoria do *big bang* é aceite pela maioria dos astrofísicos.

‘Há um plano coerente no universo; embora eu não saiba para que é esse plano.’

Fred Hoyle, 1915–2001

Destino e passado O que é que aconteceu antes do *big bang*?

Como o espaço-tempo foi criado no *big bang*, a pergunta não faz realmente sentido – é um pouco como perguntar «onde é que começa a Terra?» No entanto, há físicos que ponderam o que terá desencadeado o *big bang*, no âmbito de teorias matemáticas como a teoria-M e as teorias de cordas, em espaços multi-dimensionais. Estas teorias olham para a física de cordas e de membranas nestas dimensões mais elevadas e incorporam ideias da física de partículas e da mecânica quântica para tentarem desencadear um acontecimento como o *big bang*.

No modelo do *big bang*, ao contrário do modelo do estado estacionário, o universo evolui. O destino do cosmos é ditado em grande medida pelo equilíbrio entre a quantidade de matéria que o está a obrigar a comprimir através da gravidade e outras forças físicas que o estão a desagregar, incluindo a expansão. Se a gravidade vencer, então a expansão do universo poderá um dia interromper-se e ele pode bem começar a desabar sobre si próprio, culminando numa repetição do *big bang*, a que se chama o big crunch. Os universos poderiam seguir muitos destes ciclos de nascimento-morte. Em alternativa, se a expansão e outras forças repulsivas (como a energia escura) vencerem, elas irão acabar por conseguir desagregar todas as estrelas e galáxias e o nosso universo pode bem acabar como um deserto escuro de buracos negros e de partículas, um «big chill». Por fim, existe o «universo da Caracóis Dourados», em que as forças atractivas e repulsivas equilibram-se umas às outras e o universo expande-se para sempre, embora abrandando. É para este final que a cosmologia moderna aponta como sendo o mais provável.

a ideia resumida
A maior de todas as explosões

46 A inflação cósmica

Porque é que o universo é igual em todas as direcções? E porque é que, quando raios de luz paralelos atravessam o espaço, eles ficam paralelos de tal forma que vemos estrelas separadas? Julgamos que a resposta seja a inflação – a ideia de que o universo bebé aumentou de tamanho tão depressa, numa fracção de segundo, que as suas rugas esticaram-se até desaparecerem, e a sua expansão subsequente equilibrou-se precisamente com a gravidade.

O universo em que vivemos é especial. Quando olhamos para ele podemos ver claramente conjuntos de estrelas e galáxias distantes, sem distorções.

‘Diz-se que não existem almoços grátis. Mas o universo é realmente um almoço grátis.’

Alan Guth, n.1947

Podia facilmente ser de outra maneira. A teoria da relatividade geral de Einstein descreve a gravidade como sendo uma folha de espaço e tempo distorcida, sobre a qual os raios de luz progridem ao longo de trajectórias encurvadas (ver a página 164). Logo, pelo menos em princípio, os raios de luz podiam misturar-se, e o universo para o qual olhamos podia ficar distorcido, como os reflexos numa casa de espelhos da Feira Popular. Mas, no global, os raios luminosos tendem a viajar mais ou menos em linhas rectas através do universo, à parte umas poucas excepções, quando passam próximo de uma galáxia. A nossa perspectiva pauta pela clareza, mesmo até à fronteira do que é visível.

Planura Embora a teoria da relatividade conceba o espaço-tempo como sendo uma superfície encurvada, os astrónomos descrevem por vezes o universo como sendo «plano», o que significa que raios de luz paralelos

Cronologia

1981 D.C.

Guth propõe a inflação

1992

O satélite *COsmic Background Explorer* (COBE) detecta manchas quentes e frias e mede as suas temperaturas

geometria do universo

Graças às últimas observações do fundo de microondas, como as efectuadas pelo satélite *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMPA), os físicos foram capazes de medir a forma do espaço-tempo ao longo do universo. Comparando os tamanhos das manchas quentes e escuras no céu de microondas com os comprimentos que lhe tinham sido previstos pela teoria do *big bang*, os físicos mostram que o universo é «plano». Mesmo numa viagem ao longo de todo o universo, demorando milhares de milhões de anos, os feixes luminosos que comecem paralelos irão permanecer paralelos.

continuam a ser paralelos, não importa quão longe viagem no espaço, ou seja, o mesmo que sucederia se estivessem a mover-se numa superfície plana. Podemos imaginar o espaço-tempo como sendo uma folha de borracha, em que objectos pesados provocam depressões na folha, e estão em repouso no fundo dessas cavidades, representando a gravidade. Na verdade, o espaço-tempo tem mais dimensões (pelo menos quatro: três de espaço e uma de tempo), mas é difícil imaginá-las. O tecido do espaço-tempo também se está continuamente a expandir, devido à explosão do *big bang*. A geometria do universo é tal que a folha continua a ser essencialmente plana, como o tampo de uma mesa, à parte umas quantas irregularidades aqui e ali devido a padrões de matéria. Por isso, a trajectória da luz através do universo não é muito afectada, a não ser pelo desvio ocasional em torno de um corpo muito pesado.

Se houvesse demasiada matéria, tudo iria fazer com que a folha de borracha se encurvasse, podendo até fazer com que ela se dobrasse sobre si mesma, revertendo a expansão. Neste cenário, os raios de luz inicialmente paralelos iriam eventualmente convergir e encontrar-se num dado ponto. Se houvesse matéria a menos sobre a folha do espaço-tempo, ela iria esticar-se até se rasgar. Raios de luz paralelos iriam divergir um do outro à medida que a atravessavam. Contudo, o nosso universo parece estar algures no meio, com matéria suficiente para manter unido o tecido do universo, mas deixando que este se expanda. Por isso o universo parece estar num equilíbrio muito preciso (ver caixa).

2003

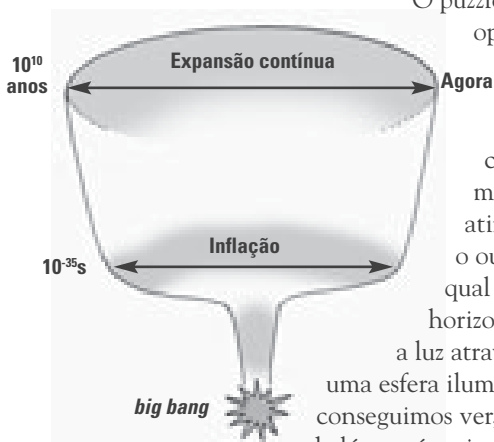
A *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) mapeia a radiação cósmica de fundo de microondas

Fundo de microondas

Uma observação comum a todos estes problemas é a da radiação cósmica de fundo de microondas. Este fundo marca o brilho residual da grande bola de fogo do *big bang*, desviado para o vermelho de tal forma que tem agora uma temperatura de 2,73 K. Ela tem precisamente 2,73 K no céu inteiro, com manchas mais quentes e outras mais frias, diferindo daquela temperatura por apenas 1 parte em 100 000. Esta medição de temperatura continua a ser, mesmo hoje, a mais precisa que já foi feita para um corpo a uma dada temperatura. Esta uniformidade é surpreendente porque, quando o universo era muito novo, as regiões do universo que estavam longe umas das outras não podiam comunicar entre si, nem sequer à velocidade da luz. É por isso intrigante que, apesar disso, elas tenham exactamente a mesma temperatura. As variações de temperatura minúsculas são os resíduos fossilizados de flutuações quânticas no universo jovem.

Tudo igual Outra propriedade do universo é o facto de ele parecer mais ou menos o mesmo em todas as direcções. As galáxias não se concentram só num ponto, estão espalhadas em todas as direcções. Isto pode não parecer surpreendente à primeira vista, mas é na realidade inesperado.

O puzzle é o facto de o universo ser tão grande que bordas opostas não deveriam ser capazes de comunicar entre si, mesmo à velocidade da luz. Por só ter existido durante 14 mil milhões de anos, o universo não tem mais do que 14 mil milhões de anos-luz de comprimento. Logo, a luz, embora esteja a mover-se à máxima velocidade que qualquer sinal transmitido pode atingir, não tem tempo de ir de um lado do universo para o outro. Então como é que um dos lados do universo sabe qual a aparência do outro? Este é o «problema do horizonte», em que o «horizonte» é a distância máxima que a luz atravessou desde o nascimento do universo, desenhando uma esfera iluminada. Há, portanto, regiões do espaço que não conseguimos ver, nem nunca seremos capazes de ver, porque a luz que de lá provém ainda não teve tempo de chegar até nós.



Regularidade O universo também é muito regular, muito «liso». As galáxias distribuem-se de uma forma muito uniforme pelo céu. Se quase

fecharem os olhos, vêem que elas formam um brilho regular, em vez de se aglomerarem em poucas manchas. Mais uma vez, não era obrigatório que isto tivesse acontecido. As galáxias cresceram, ao longo do tempo, graças à gravidade. Começaram por ser só um ponto ligeiramente mais denso no gás que sobrou do *big bang*. Esse ponto começou a colapsar devido à gravidade, formando estrelas e eventualmente originando uma galáxia. As sementes originais, super-densas, das galáxias foram causadas por efeitos quânticos, desvios minúsculos nas energias das partículas no universo embrionário escaldante. Mas podia muito bem ter acontecido que esses desvios se tivessem amplificado, formando grandes manchas de galáxias, como a pele de uma vaca, em vez do mar de galáxias espalhadas por toda a parte que observamos. Há muitíssimas colinas pequenas na distribuição de galáxias, em vez de haver apenas umas quantas cordilheiras gigantes.

Crescimento rápido Os problemas da planura, horizonte e regularidade podem ser resolvidos com uma única ideia: a inflação. A inflação foi desenvolvida em 1981 por Alan Guth. O problema do horizonte – que o universo parece ser o mesmo em todas as direcções embora seja demasiado grande para «saber» disso – implica que o universo deve ter sido tão pequeno que a luz conseguia comunicar com todas as suas regiões. Como já não é assim hoje em dia, o universo deve ter aumentado de tamanho de uma forma muito inflacionada, até atingir o tamanho proporcionalmente maior que observamos. Mas este período de inflação deve ter acontecido muito rapidamente, muito mais depressa do que a velocidade da luz. A expansão rápida alisou todas as ligeiras variações de densidade que tinham sido causadas pelas flutuações quânticas, da mesma maneira que os desenhos na superfície de um balão se tornam mais ténues quando o enchemos. E assim o universo torna-se muito regular. O processo inflacionário também resolveu o equilíbrio subsequente entre a gravidade e a expansão final, que depois da inflação prossegue a um ritmo muito mais relaxado. A inflação ocorreu quase imediatamente a seguir à bola de fogo do *big bang* (10^{-35} segundos depois).

A inflação ainda não foi provada, e a razão por trás dela pode bem nunca vir a ser entendida – há tantos modelos para a inflação quanto há teóricos – mas compreendê-la é o objectivo da próxima geração de experiências de cosmologia, incluindo a produção de mapas mais detalhados da radiação cósmica de fundo de microondas, e da sua polarização.

“É realmente fantástico dar-mo-nos conta de que as leis da física podem crescer como é que tudo foi criado a partir de uma flutuação quântica aleatória a partir do nada.”

Alan Guth, n. 1947

a ideia resumida

Crescimento cósmico rápido

47 Matéria escura

Noventa por cento da matéria do universo não brilha, é escura. Ela é detectável pelos seus efeitos gravitacionais, mas quase não interage com ondas luminosas ou com matéria. Os cientistas acreditam que ela pode existir sob a forma de MACHOs, estrelas falhadas e planetas gasosos, ou WIMPs, partículas subatômicas exóticas – a caça à matéria escura é a nova fronteira selvagem da física.

A matéria escura parece ser exótica, e pode bem vir a ser, mas a sua definição é bastante terra-a-terra. A maior parte das coisas que vemos no universo brilham porque emitem ou reflectem luz. As estrelas brilham emitindo fotões, e os planetas brilham porque reflectem a luz do Sol. Sem essa luz, pura e simplesmente não os veríamos. Quando a Lua passa pela sombra da Terra, ela fica escura; quando as estrelas queimam o seu combustível, deixam para trás carcaças demasiado escuras para poderem ser vistas; mesmo um planeta tão grande quanto Júpiter seria invisível se andasse à solta muito longe do Sol. De forma que talvez não seja uma grande surpresa que a maior parte da matéria do universo não brilhe. É matéria escura.

Lado negro Embora não possamos ver a matéria escura directamente, podemos detectar a sua massa através da sua atracção gravitacional sobre outros objectos astronómicos e sobre raios luminosos. Se por acaso não soubéssemos que a Lua estava por cima das nossas cabeças, poderíamos deduzir a sua presença porque a gravidade dela altera um pouco a órbita da Terra. Até já usámos este abanão-induzido-pela-gravidade, aplicado a estrelas distantes, para descobrir planetas que girem em torno delas.

Cronologia

1933 D.C.

Zwicky mede matéria escura
no aglomerado Coma

Orçamento energético

Hoje sabemos que só cerca de 4% da matéria do universo é feita de bárions (a matéria normal, que inclui prótons e nêutrons). Outros 23% são feitos de matéria negra exótica. Sabemos que ela não é composta por bárions. É difícil dizer de que é feita, mas poderão bem ser partículas como os WIMPs. O resto do orçamento de energia do universo consiste numa coisa completamente diferente, a energia escura.

Nos anos 1930, o astrónomo suíço Fritz Zwicky deu-se conta de que um aglomerado gigante de galáxias próximo de nós estava a comportar-se de uma maneira que implicava que a sua massa era muito maior do que a soma das massas de todas as galáxias que nele se encontravam. Ele deduziu que neste aglomerado havia um tipo de matéria escura desconhecido que contribuía com cerca de 400 vezes mais massa do que a matéria luminosa. A quantidade enorme de matéria escura foi uma grande surpresa, e sugeria que a maior parte do universo não estava sob a forma de estrelas e de gás, mas sim sob outra forma qualquer. Então o que é esta coisa escura? E onde é que ela se esconde?

Nas galáxias espirais individuais também falta massa. Nas regiões mais externas o gás roda mais depressa do que deveria se a massa da galáxia fosse devida apenas às massas combinadas das estrelas que a compõem. De forma que essas galáxias têm uma massa maior do que a que esperaríamos se olhássemos apenas para a luz que elas emitem. Mais uma vez, a matéria escura extra que é necessária é centenas de vezes mais abundante que as estrelas e gás visíveis. A matéria escura não só se espalha entre as galáxias como a sua massa é tão elevada que domina os movimentos das estrelas dentro de cada uma das galáxias. A matéria escura até se estende para além de onde há estrelas, preenchendo um «halo» esférico, ou bolha, em torno dos discos achatados de todas as galáxias em espiral.

Ganho de peso Os astrónomos já conseguiram mapear a presença de matéria escura, não só em galáxias individuais mas também em aglomerados de galáxias, que contêm milhares de

1975

Vera Rubin mostra que a rotação das galáxias é afectada pela matéria escura

1998

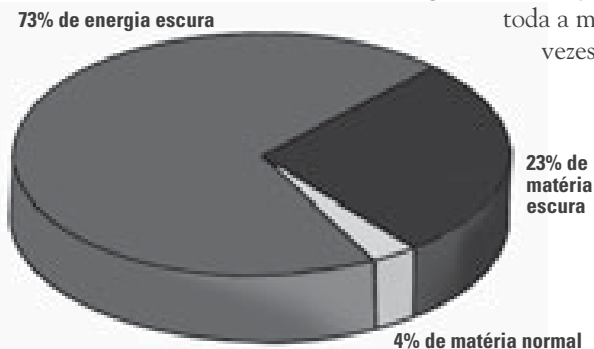
Deduz-se que os neutrinos têm uma massa pequena

2000

Detectam-se MACHOs na Via Láctea

galáxias unidas entre si pela sua gravidade mútua, e em superaglomerados de galáxias, cadeias de aglomerados que formam vastas teias que se estendem por todo o espaço. A matéria escura está presente onde quer que

a gravidade esteja a actuar, a todas as escalas. Se somarmos toda a matéria escura, descobrimos que há mil vezes mais coisas escuras do que matéria luminosa.



O destino final do universo depende do seu peso total.

A atracção da gravidade contrabalança a expansão do universo que se seguiu à explosão do *big bang*. Há três resultados possíveis. Ou o universo é tão pesado que a gravidade ganha e o universo eventualmente acaba por

colapsar sobre si próprio (um universo fechado que termina num *big crunch*), ou há demasiado pouca massa e ele expande-se para sempre (um universo aberto), ou o universo está num equilíbrio muito preciso e a expansão vai gradualmente abrandando devido à gravidade, mas isso demora tanto tempo que a expansão nunca termina. Este último cenário parece ser o caso do nosso universo: ele tem exactamente a quantidade de matéria que deveria ter para abrandar, mas nunca interromper, a expansão.

WIMPs e MACHOs De que é que a matéria negra poderá ser feita? Em primeiro lugar, de nuvens de gás escuras, estrelas pouco brilhantes ou planetas não-iluminados. A estes objectos chamamos MACHOs, ou seja, *Massive Compact Halo Objects*. Em alternativa, a matéria negra poderá bem ser novos tipos de partículas subatómicas, chamadas WIMPs, acrónimo de *Weakly Interacting Massive Particles*, que não teriam praticamente nenhum efeito sobre outros tipos de matéria ou luz.

Os astrónomos encontraram MACHOs um pouco por toda a nossa galáxia. Como os MACHOs são grandes, comparáveis ao planeta Júpiter, eles podem ser descobertos individualmente devido aos seus efeitos gravitacionais. Se um grande planeta gasoso, ou uma estrela falhada, passa em frente de um estrela de fundo, a sua gravidade dobra a luz em seu redor. Esta dobragem foca a luz quando o MACHO está mesmo em frente à

“O universo é feito sobretudo de matéria escura e energia escura, e não sabemos o que ambas são.”

Saul Perlmutter, 1999

estrela, de forma que a estrela, por um momento, parece ser muito mais brilhante enquanto o MACHO passa. A isto chama-se um efeito de «lente gravitacional».

Em termos da teoria da relatividade, o planeta MACHO distorce o espaço-tempo, como uma bola pesada a fazer uma cavidade numa folha de borracha, e isso encurva a frente de onda da luz em redor de si (ver a página 164). Os astrónomos têm procurado por este aumento do brilho de estrelas causado pela passagem de um MACHO entre nós e elas, em milhões de estrelas de fundo. Encontraram uns quantos destes *flashes*, mas demasiado poucos para explicar toda a massa em falta na Via Láctea.

Os MACHOs são feitos de matéria normal, a que chamamos bariões, feita de prótons, neutrões e electrões. O limite mais restritivo na quantidade de bariões do universo é dado investigando o isótopo pesado do hidrogénio, o deutério. O deutério só foi produzido no próprio *big bang* e não se forma nas estrelas depois disso, embora possa ser queimado em estrelas. Logo, medindo a quantidade de deutério em nuvens de gás no espaço intocadas, os astrónomos conseguem estimar o número total de prótons e de neutrões que se formou no *big bang*, porque o mecanismo para formar deutério é conhecido com grande precisão. Este cálculo dá-nos só uns poucos por cento da massa do universo inteiro. Portanto, o resto do universo tem de ser feito de matéria de um tipo completamente diferente, como os WIMPs.

A procura por WIMPs é aquilo em que agora concentramos a nossa atenção. Como estas partículas interactivam muito fracamente, elas são intrinsecamente difíceis de detectar. Um dos candidatos é o neutrino. Na última década, os físicos mediram a sua massa e descobriram que ela é pequena, mas não é zero. Os neutrinos dão conta de alguma da massa do universo mas, mais uma vez, não toda a que falta. De forma que há ainda espaço para outras partículas mais exóticas que estão por aí à espera de serem detectadas, algumas delas provenientes de nova física, como os axiões e os fotinos. Compreender a matéria escura pode muito bem vir a lançar luz sobre os problemas do mundo da física.

a ideia resumida

O lado negro do universo

48 A constante cosmológica

Einstein disse que adicionar a sua constante cosmológica às equações da relatividade geral tinha sido o seu maior disparate. Este termo permitia que se acelerasse ou abrandasse a velocidade de expansão do universo, para compensar a gravidade. Einstein não precisava deste número e abandonou-o. No entanto, novas evidências nos anos 1990 exigiram que ele fosse reintroduzido. Os astrónomos descobriram que uma energia escura misteriosa está a provocar a expansão do universo, acelerando-a, levando a uma reescrita da cosmologia moderna.

Albert Einstein pensava que vivíamos num universo estacionário, não num universo com um *big bang*. Ao tentar escrever as equações para esse universo, deparou-se com um problema. Se só se tivesse a gravidade, tudo no universo iria acabar por colapsar para um ponto, talvez um buraco negro. Era óbvio que o universo não era assim, e que parecia ser estável. Por isso, Einstein acrescentou um outro termo à sua teoria para contrabalançar a gravidade, uma espécie de termo de «anti-gravidade» repulsiva. Ele introduziu isto simplesmente para fazer com que as equações parecessem estar correctas, não porque soubesse da existência de uma tal força. Mas esta formulação teve problemas de imediato.

Se houvesse uma contra-força para a gravidade, então, tal como uma gravidade sem oposição podia provocar um colapso, uma força de anti-gravidade poderia, com igual facilidade, fazer em pedaços regiões do universo que não estivessem ligadas entre si pela «cola» da gravidade. Em

Cronologia

1915 D.C.

Einstein publica a teoria da relatividade geral

1929

Hubble mostra que o espaço se está a expandir e Einstein abandona a sua constante

vez de permitir esse rasgão do universo, Einstein preferiu ignorar este segundo termo repulsivo e admitiu que tinha cometido um erro ao introduzi-lo. Outros físicos também preferiram excluí-lo, relegando-o para a história. Ou pelo menos assim pensavam. O termo não foi esquecido – foi preservado nas equações da relatividade, mas o seu valor, a constante cosmológica, foi posto igual a zero para que não tivesse qualquer efeito.

Universo acelerado Nos anos 1990, dois grupos de astrónomos estavam a mapear supernovas em galáxias distantes para medirem a geometria do espaço e descobriram que as supernovas longínquas pareciam ser menos intensas do que deveriam. Há muitos tipos de supernovas, que são explosões brilhantes de estrelas a morrer. As supernovas Tipo IA têm um tipo de brilho que se pode prever, e são úteis para inferir distâncias. Tal como as estrelas variáveis Cefeidas que foram usadas para medir as distâncias às galáxias e assim estabelecer a lei de Hubble, o brilho intrínseco das supernovas Tipo IA pode ser obtido a partir dos seus espectros luminosos, de tal forma que é possível dizer o quão distantes elas deverão estar. Isto funcionou muito bem para supernovas que estavam próximas, mas as supernovas mais distantes eram demasiado fracas. Era como se elas estivessem mais longe de nós do que deveriam estar.

“Durante 70 anos, estivemos a tentar medir o ritmo segundo o qual o universo estava a abrandar. Finalmente conseguimos, e descobrimos que ele está a acelerar.”

Michael S. Turner, 2001

À medida que se descobriram mais e mais supernovas distantes, o padrão da diminuição do brilho com a distância começou a sugerir que a expansão do universo não era constante, como na lei de Hubble, mas sim que estava a acelerar. Isto foi um choque imenso para a comunidade cosmológica, e ainda está a ser muito discutido.

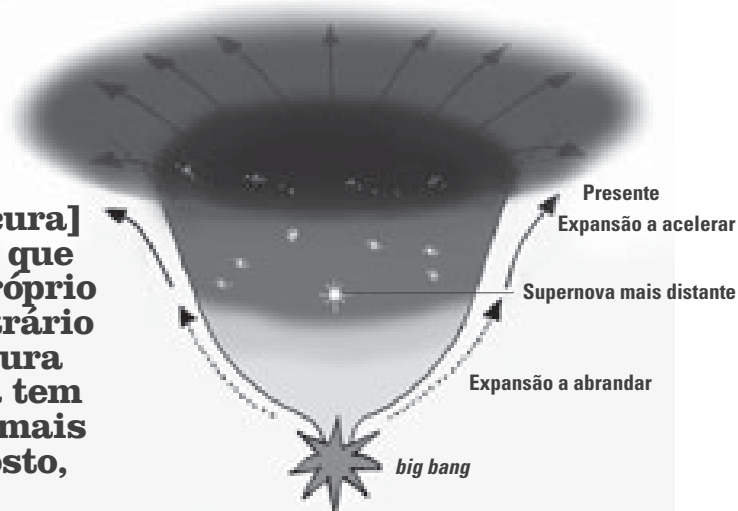
Os resultados das supernovas estavam de acordo com as equações de Einstein, mas só se se incluísse um termo negativo, de tal forma que a constante cosmológica passasse de zero para cerca de 0,7. Os resultados das supernovas, juntamente com outros dados cosmológicos, tais como o padrão da radiação cósmica de fundo de microondas, mostraram que era necessário que houvesse uma nova força repulsiva que contrabalançasse a gravidade. Mas era uma força muitíssimo fraca. Continua a ser um grande mistério porque é tão fraca, visto que não há nenhuma razão específica para não ter adoptado um valor muito maior, talvez dominando por

1998

Dados de supernovas indicam a necessidade de uma constante cosmológica

«[A energia escura] parece ser algo que está ligado ao próprio espaço e, ao contrário da matéria escura que gravita, ela tem um efeito que é mais ou menos o oposto, contrário à gravidade, ela faz com que o universo seja repellido por si próprio.»

Brian Schmidt, 2006



completo o espaço, sobrepondo-se à gravidade. Em vez disso, esta força tem uma intensidade muito próxima da da gravidade, e por isso só tem um efeito subtil no espaço que vemos hoje em dia. Chamou-se «energia escura» a este termo de energia negativa.

Energia escura

A origem da energia escura é ainda um mistério. Tudo o que sabemos é que é uma forma de energia associada ao vácuo do espaço livre, que causa uma pressão negativa em regiões desprovidas de matéria com gravidade atractiva. Por isso, ela faz com que as regiões de espaço vazio «inchem». Conhecemos, mais ou menos, a sua intensidade devido às observações das supernovas, mas não sabemos muito mais. Não sabemos se é realmente uma constante – ou seja, se toma realmente o mesmo valor por todo o universo, e ao longo do tempo (como acontece para a gravidade e para a velocidade da luz) – ou se, pelo contrário, o seu valor muda ao longo do tempo, de tal forma que possa ter tido um valor muito diferente logo após o *big bang*, comparado com o valor de agora ou no futuro. Na sua forma mais geral, também se lhe chamou «quintessência» ou a quinta força, englobando todas as formas pelas quais a sua intensidade poderia mudar com o tempo. Mas ainda não se sabe como é que esta força fugidia se manifesta, ou como é que emerge da física do *big bang*. Este estudo é um assunto muito na berra para os físicos.

Hoje em dia compreendemos muito melhor a geometria do universo, e aquilo de que ele é feito. A descoberta da energia escura equilibrou os livros de contabilidade da cosmologia, permitindo completar o que faltava no orçamento de energia do universo como um todo. Sabemos agora que esse orçamento é composto de 4% de matéria bariónica, 23% de matéria exótica não-bariónica e 73% de energia escura. Estes números somam-se para dar exactamente

‘Deve enfatizar-se, contudo, que uma curvatura positiva para o espaço é dada pelos nossos resultados, mesmo se o termo suplementar [a constante cosmológica] não for introduzido. Esse termo só é necessário para o objectivo de tornar possível uma distribuição de matéria quase-estática.’

Albert Einstein, 1918

a quantidade necessária de tralha para o «universo Caracóis Dourados» em equilíbrio, próximo da massa crítica em que o universo não está nem aberto nem fechado.

No entanto, as qualidades misteriosas da energia escura significam que, mesmo sabendo a massa total do universo, o seu comportamento futuro é difícil de prever, visto depender da influência da energia escura aumentar ou não no futuro. Se o universo estiver a acelerar, então, neste instante preciso, a energia escura tem uma importância mais ou menos igual à da gravidade sobre o universo. Mas, nalgum instante, a aceleração vai chegar a um ponto que a expansão mais rápida vai dominar sobre a gravidade. Logo, o destino do universo pode bem ser expandir-se para todo o sempre, cada vez mais depressa. Já foram propostos uns quantos cenários assustadores – assim que a gravidade for superada estruturas imensas que até então se mantinham tenuemente unidas irão desagregar-se e voar em pedaços, eventualmente até as galáxias vão desintegrar-se, depois as estrelas vão evaporar-se, deixando apenas uma névoa de átomos. Por fim, a pressão negativa poderá até desfazer os átomos, deixando apenas um mar desolado de partículas subatómicas.

Mesmo assim, embora o puzzle da cosmologia se esteja finalmente a encaixar, e já tenhamos medido uma série de números que descrevem a geometria do universo, continuam a haver algumas grandes perguntas por responder. Pura e simplesmente não sabemos de que é feito 95% do universo, nem o que realmente é esta nova força da quintessência. Por isso ainda não chegou a altura de nos sentarmos à sombra da bananeira do nosso sucesso. O universo continua a ser misterioso.

a ideia resumida
A quinta força

49 O paradoxo de Fermi

Detectar vida noutra parte do universo seria a maior descoberta de sempre. Enrico Fermi perguntou-se porque é que, dada a idade e a vastidão do universo, e a presença de milhares de milhões de estrelas e planetas que existem há milhares de milhões de anos, ainda não fomos contactados por nenhuma civilização extraterrestre. Foi este o seu paradoxo.

Numa conversa ao almoço com os seus colegas em 1950, o professor de física Enrico Fermi perguntou: «Onde é que eles estão?» A nossa galáxia contém milhares de milhões de estrelas, e há milhares de milhões de galáxias no universo. Se uma fracção dessas estrelas servir de âncora a planetas, isso significa uma data de planetas. Se uma fracção desses planetas for capaz de servir de abrigo à vida, deveria haver milhões de civilizações por aí. Então porque é que não as vemos? Porque é que elas não entraram em contacto connosco?

A equação de Drake Em 1961, Frank Drake escreveu uma equação para calcular a probabilidade de uma civilização extraterrestre contactável estar a viver noutro planeta da Via Láctea. Ficou conhecida como a equação de Drake. Ela diz-nos que existe uma possibilidade de coexistirmos com outra civilização, mas que a probabilidade de isso ocorrer é muito incerta. Carl Sagan sugeriu a dada altura que poderia chegar a haver um milhão de civilizações extraterrestres na Via Láctea, mas mais tarde reviu esta estimativa, e outros já estimaram que o valor seja apenas um, ou seja, os humanos. Passado mais de metade de um século desde que Fermi fez a

Cronologia

1950 D.C.

Fermi questiona-se acerca da ausência de contacto com extraterrestres

1961

Drake concebe a sua equação

pergunta, continuamos sem saber nada. Apesar dos nossos sistemas de comunicação, ninguém nos ligou. Quanto mais exploramos a nossa vizinhança local, mais sozinhos parecemos estar. Ainda não se encontraram nenhuns sinais sólidos de vida, nem sequer a mais simples das bactérias, na Lua, em Marte, nos asteróides, nos planetas do sistema solar externo ou nas suas luas. Não há sinais de interferência na luz provinda das estrelas, que pudesse indicar máquinas gigantescas nas suas órbitas, a recolherem energia delas. E não é porque não tenhamos procurado. Dada a importância do assunto, está-se a dedicar muita atenção à procura de inteligência extraterrestre.

‘Quem somos nós? Descobrimos que vivemos num planeta insignificante numa estrela banal perdida numa galáxia escondida num qualquer canto esquecido do universo, no qual há muito mais galáxias do que pessoas.’

Werner von Braun, 1960

Procura por vida Então, como é que se procura por sinais de vida? A primeira maneira é começar por procurar micróbios dentro do nosso sistema solar. Os cientistas já escrutinaram rochas da Lua, mas elas são só feitas de basalto inanimado. Já se sugeriu que meteoritos de Marte poderiam hospedar restos de bactérias, mas ainda não foi demonstrado que as bolhas ovulares vistas em algumas dessas rochas tenham de facto sido vida alienígena, e não tenham sido simplesmente o resultado de contaminação por terem caído na Terra, ou sido produzidas por processos geológicos naturais. Mesmo sem amostras de rochas, as câmaras de espaçonaves e veículos de aterragem já pesquisaram as superfícies de Marte, de asteróides e agora até de uma lua no sistema solar externo – Titã, em órbita em torno de Saturno.

Mas a superfície de Marte é um deserto árido de areia e rochas vulcânicas, não muito diferente do deserto de Atacama, no Chile. A superfície de Titã é húmida, banhada por metano líquido, mas até ao momento parece ser desprovida de vida. Uma das luas de Júpiter, Europa, tem sido apresentada como um alvo muito popular para procuras futuras por vida no sistema solar, porque pode ter mares de água líquida por baixo da sua superfície congelada. Cientistas espaciais estão a planear uma missão em Europa que irá perfurar a crosta de gelo e olhar para o que há por baixo dela. Já se descobriu que outras luas do sistema solar exterior têm muita actividade geológica, que liberta calor, devido a estarem a ser comprimidas e puxadas pelas forças gravitacionais que sentem nas suas órbitas em torno dos planetas gasosos gigantes. De

1996

Meteoritos na Antártida sugerem que possa ter existido vida primitiva em Marte

Equação de Drake

$$N = N_* \times f_p \times n_e \times f_i \times f_f \times f_c \times f_L$$

em que:

N é o número de civilizações na galáxia da Via Láctea cujas emissões electromagnéticas são detectáveis.

N_* é o número de estrelas na galáxia.

f_p é a fracção dessas estrelas com sistemas planetários.

n_e é o número de planetas, por sistema solar, com um ambiente propício para a vida.

f_i é a fracção de planetas adequados em que a vida de facto aparece.

f_f é a fracção de planetas com vida em que emerge vida inteligente.

f_c é a fracção de civilizações que desenvolvem uma tecnologia que emita sinais detectáveis da sua existência para o espaço.

f_L é a fracção da vida de um planeta em que essas civilizações emitem para o espaço sinais detectáveis (para a Terra, esta fracção é até agora muito pequena).

forma que talvez a água líquida não seja muito rara no sistema solar exterior, o que levanta as expectativas de que um dia poderemos vir a descobrir vida nesses locais. As espaçonaves que visitam estas regiões são exaustivamente esterilizadas para se ter a certeza de que não as contaminamos com micróbios estrangeiros, provindos da Terra.

Mas os micróbios não vão ligar para casa. E que tal animais ou plantas mais sofisticados? Agora que já se estão a detectar planetas individuais em redor de estrelas distantes, os astrónomos estão a planear dissecar a luz que vem deles para procurar sinais de química que pudesse albergar ou indicar a presença de vida. É possível que se consigam detectar indícios espectrais de ozono ou de clorofila, mas para isso serão necessárias observações muito precisas, como as que serão permitidas pela nova geração de missões espaciais, das quais o Terrestrial Planet Finder da NASA é um exemplo. Estas missões poderão um dia vir a descobrir uma outra Terra, mas se o fizessem, ela seria povoada por humanos, peixes ou dinossauros, ou conteria apenas continentes e mares desprovidos de vida?

Contacto A vida noutros planetas, mesmo aqueles parecidos com a Terra, pode muito bem ter evoluído de forma diferente. Não é certo que os alienígenas nesses planetas fossem capazes de comunicar connosco na Terra. Desde que começaram as emissões de rádio e de televisão, os sinais espalharam-se para longe da Terra à velocidade da luz. Por isso, os fãs de TV em Alfa Centauro (a 4 anos-luz de distância) estarão a ver os canais terrestres de há 4 anos atrás, talvez a divertirem-se com repetições do filme *Contacto*. Ou seja, a Terra está a emitir imensos sinais,

“Seria o cúmulo da arrogância pensar que somos as únicas coisas vivas nessa enorme imensidade.”

Carl Sagan, 1980

outras civilizações avançadas não fariam o mesmo? Os radioastrónomos estão a vasculhar as estrelas mais próximas para ver se descobrem indícios de sinais não-naturais. Mas o espectro rádio é enorme, por isso eles estão a concentrar-se em frequências próximas de transições naturais de energia fundamentais, como as do hidrogénio, que deverão ser iguais por todo o universo. Estão à procura de transmissões que sejam regulares, ou estruturadas, mas que não sejam causadas por nenhuns objectos astronómicos que se conheçam. Em 1967, a estudante de doutoramento Jocelyn Bell apanhou um susto em Cambridge, na Inglaterra, quando descobriu pulsos regulares de ondas de rádio vindos de uma estrela. Pensou que seriam um Código Morse extraterrestre, mas na realidade era um novo tipo de estrela de neutrões em rotação, a que hoje chamamos pulsar. Como este processo de vasculhar milhares de estrelas demora imenso tempo, começou-se um programa especial nos EUA chamado SETI (Search for Extra Terrestrial Intelligence). Apesar de se terem analisado dados durante anos, ainda não se detectaram nenhuns sinais estranhos.

Fomos almoçar Então, dado que conseguimos pensar em muitas maneiras de comunicar com e detectar sinais de vida extraterrestre, porque é que eventuais civilizações não estarão a responder às nossas chamadas, ou a enviar-nos as suas próprias mensagens? Porque é que o paradoxo de Fermi continua a ser verdade? Há muitas ideias a este respeito. Talvez a vida só exista durante um período muito curto num estado avançado o suficiente para permitir comunicação com outras civilizações. E a que se deveria isso? Talvez a vida inteligente se destrua a si mesma muito depressa. Talvez seja autodestrutiva e não sobreviva durante muito tempo, por isso, a probabilidade de ter alguém por perto com quem comunicar seja de facto muitíssimo baixa. E também há outros cenários, mais paranóicos. Talvez os extraterrestres simplesmente não queiram contactar connosco e estejamos, deliberadamente, a ser deixados isolados. Ou também é possível que eles estejam demasiado ocupados e ainda não se tenham dado ao trabalho de nos fazer uma chamada.

a ideia resumida
Há mais alguém por aí?

50 O princípio antrópico

O princípio antrópico¹ afirma que o universo é como é porque se fosse diferente nós não estaríamos cá para o observar. É uma explicação para os parâmetros da física terem o valor que têm desde o tamanho das forças nucleares à energia escura e à massa do electrão. Se qualquer desses parâmetros variasse, mesmo que um pouco, o universo seria inabitável.

¹ Na opinião do tradutor, que é físico, o «princípio antrópico» não é física. (N. do T.)

Se a força nuclear forte fosse um pouco diferente do que é, os prótons e os neutrões não se agarrariam uns aos outros para formarem núcleos, e os átomos não se poderiam formar. A química não poderia existir. O carbono não existiria e, portanto, também não existiriam nem biologia nem seres humanos. Se não existíssemos, quem iria «observar» o universo e impedi-lo de existir como apenas uma sopa de probabilidades?

Da mesma forma, ainda que existissem átomos e o universo tivesse evoluído de forma a originar todas as estruturas existentes, bastava que a energia escura fosse um pouco mais forte para as estrelas terem sido despedaçadas. Logo, pequenas mudanças nos valores das constantes físicas, nos tamanhos das forças ou nas massas das partículas, podem ter implicações catastróficas. Dito de outra forma, o universo parece estar ajustado de uma forma muito precisa. As forças estão num estado «ideal» para a humanidade ter evoluído. Será um acaso que estejamos a viver num universo que tem 14 mil milhões de anos de idade, em que a energia escura

Cronologia

1904 D.C.

Alfred Wallace discute o papel do homem no universo

1957

Robert Dicke escreve que o universo é constrangido por factores biológicos

e gravidade se equilibram uma à outra, e em que as partículas subatômicas tomam as formas que têm?

Mesmo bom Em vez de aceitar que a humanidade é particularmente especial, e que o universo todo foi preparado à nossa medida, o que é talvez uma hipótese bastante arrogante, o princípio antrópico explica que isto não é surpresa nenhuma. Se alguma das forças fosse ligeiramente diferente, pura e simplesmente não estaríamos cá para sermos testemunhas desse facto. Tal como o facto de existirem muitos planetas, mas tanto quanto sabemos só um deles é que tem as condições necessárias para a existência de vida, o universo poderia ter sido feito de muitas maneiras, mas esta é a única em que nós poderíamos ter existido. Da mesma forma, se os meus pais nunca se tivessem encontrado, se o motor de combustão não tivesse sido inventado quando foi e o meu pai não tivesse sido capaz de viajar para norte para conhecer a minha mãe, então eu não estaria aqui. Isso não significa que o universo inteiro evoluiu só para que eu pudesse existir. Mas o facto de eu existir requereu, em última análise, e entre outras coisas, que o motor a combustão tivesse sido inventado a certa altura, e isso limita a gama de universos em que me poderiam encontrar.

“Os valores observados para todas as quantidades físicas e cosmológicas não são igualmente prováveis mas tomam valores restringidos pelo requerimento de que existam sítios onde vida baseada no carbono possa evoluir e... que o Universo possa ser velho o suficiente para isso já ter acontecido.”

John Barrow e Frank Tipler, 1986

O princípio antrópico foi usado como argumento na física e na cosmologia por Robert Dicke e Brandon Carter, embora já fosse familiar aos filósofos. Uma das suas formulações, o princípio antrópico fraco, afirma que não estaríamos aqui se os parâmetros fossem diferentes, logo o facto de existirmos restringe as propriedades de universos físicos habitáveis nos quais pudéssemos estar. Uma outra versão mais forte enfatiza a importância da nossa própria existência, de tal forma que a vida é um resultado obrigatório para um universo existente. Por exemplo, são necessários observadores para tornar concreto um universo quântico, ao observá-lo. John Barrow e Frank Tipler também sugeriram outra versão, em que o processamento de informação

1973

Brandon Carter discute o princípio antrópico

Bolhas antrópicas

Conseguimos evitar o dilema antrópico se houver muitos universos, ou bolhas, paralelos a fazer companhia ao nosso. Cada universo-bolha pode tomar valores ligeiramente diferentes dos parâmetros da física. Esses parâmetros controlam a forma como cada universo evolui, e também a possibilidade de um dado universo vir a providenciar um sítio simpático em que a vida se possa formar. Tanto quanto sabemos, a vida é muito esquisita e, portanto, só vai escolher uns

quantos universos. Mas como existem tantos universos-bolha continua a haver a possibilidade de a vida aparecer, e por isso a nossa existência não é assim tão improvável.



é um dos objectivos fundamentais do universo, pelo que a sua existência tem de produzir criaturas capazes de processarem informação.

Muitos mundos Para produzir humanos é preciso que o universo seja velho, para que haja tempo suficiente para as gerações anteriores de estrelas já terem produzido carbono, e que as forças nucleares forte e fraca sejam «mesmo boas» para que a física nuclear e a química sejam permitidas. A gravidade e a energia escura também têm de estar equilibradas para se fazerem estrelas, em vez de despedaçarem o universo. Mais, as estrelas têm de viver durante bastante tempo para deixar que os planetas se formem, e têm de ser grandes o suficiente para que consigamos encontrar um planeta temperado simpático nos subúrbios onde nos possamos estabelecer, que tenha água, azoto, oxigénio e todas as outras moléculas necessárias para semear a vida.

Como os físicos conseguem imaginar universos onde estas quantidades são diferentes, alguns deles sugeriram que esses universos podem ser criados tão facilmente quanto o nosso. Eles poderão existir sob a forma de universos paralelos, ou multiversos, de forma que nós só podemos existir numa dessas variações.

A ideia de universos paralelos encaixa-se bem com o princípio antrópico, porque permite que existam outros universos, nos quais nós não podemos existir. Esses universos poderão existir em múltiplas dimensões, e estarem separados da maneira que a teoria quântica requer para que observações desencadeiem resultados (ver a página 115).

“Para fazer uma torta de maçã começando do zero, primeiro é preciso criar o universo.”

Carl Sagan, 1980

Por outro lado O princípio antrópico tem os seus críticos. Alguns pensam que é um truísmo – as coisas são assim porque são assim – e que não nos diz nada de novo. Outros não gostam de só termos este universo para testar, e preferem procurar por maneiras matemáticas de «regular» automaticamente o nosso universo, para que ele saia directamente das equações, devido à física. A ideia do multiverso aproxima-se desta tentativa, ao permitir um número infinito de alternativas. E ainda há outros teóricos, entre os quais os teóricos de cordas e proponentes da teoria-M, que estão a tentar ir para lá do *big bang*, para ajustar os parâmetros com precisão. Eles olham para o mar quântico que precedeu o *big bang* como um tipo de paisagem de energia, e perguntam-se onde é que é mais provável, nessa paisagem, que um universo acabe por parar, se o deixarem «rolar» e desenvolver-se à vontade.

Os proponentes do princípio antrópico e outros, que investigam meios mais matemáticos de chegarmos ao universo que conhecemos, discordam na forma como chegámos ao local onde estamos, e nem sequer estão de acordo que essa pergunta seja interessante. Assim que passamos para lá do *big bang* e do universo observável, para os reinos de universos paralelos e campos de energia pré-existentes, estamos na realidade no campo da filosofia. Mas o que quer que tenha feito com que o universo se tenha desencadeado da forma que aconteceu, temos sorte de ele ter acabado por dar aquilo que vemos, milhares de milhões de anos mais tarde. É compreensível que ele tenha demorado tempo a cozinhar a química necessária para a vida. Mas o porquê de estarmos a viver aqui, neste instante específico da história do universo, em que a energia escura é relativamente benigna e equilibra a gravidade, é mais do que sorte.

a ideia resumida
O universo mesmo bom

Glossário

Aceleração A mudança no tempo da velocidade de alguma coisa.

Aleatoriedade Um resultado aleatório só é determinado pelo acaso. Não há nenhum resultado específico que seja favorecido.

Átomo A unidade de matéria mais pequena que consegue existir de maneira independente. Os átomos contêm um núcleo central duro, feito de prótons (de carga positiva) e neutrões (sem carga), rodeado por nuvens de electrões (de carga negativa).

Bosão Uma partícula com uma função de onda simétrica; dois bosões podem ocupar o mesmo estado quântico (ver também Fermião).

Campos Uma forma de transmitir uma força à distância. A electricidade e o magnetismo são campos, tal como a gravidade.

Comprimento de onda A distância do pico de uma onda ao pico adjacente.

Desvio para o vermelho O desvio para o vermelho da luz de um objecto a afastar-se, devido ao efeito de Doppler ou à expansão cosmológica. Em astronomia, é uma maneira de medir distâncias a estrelas e galáxias longínquas.

Difracção O espalhamento de ondas quando passam por uma aresta afiada, como por exemplo ondas de água a entrarem num porto através de uma abertura no paredão.

Dualidade onda-partícula Oportamento, por exemplo da luz, que por vezes é parecido com o de ondas e noutras alturas com o de partículas.

Elasticidade Os materiais elásticos obedecem à lei de Hooke. O comprimento segundo o qual se esticam é proporcional à força que lhes é aplicada.

Electricidade O fluxo da carga eléctrica. Tem alguma tensão (energia), pode causar uma corrente (fluxo) e pode ser abrandada ou bloqueada pela resistência.

Energia Uma propriedade de um sistema, que dita o seu potencial para mudanças. É globalmente conservada mas pode ser trocada sob muitas formas diferentes.

Entrelaçamento Na teoria quântica, é a ideia de que as partículas que estejam relacionadas num dado instante carregam consigo informação em períodos posteriores e podem ser usadas para enviar sinais instantâneos.

Entropia Uma medição da desordem. Quanto mais ordenada uma coisa é, menor é a sua entropia.

Esforço O quanto algo se estica quando está a ser puxado, por unidade de comprimento.

Espectro A sequência das ondas electromagnéticas, desde as ondas de rádio, passando pela luz visível, até aos raios X e aos raios gama.

Fase O desvio relativo entre uma onda e outra, medida em frações

do comprimento de onda. Um desvio de um comprimento de onda completo corresponde a 360 graus; se o desvio relativo for de 180 graus, as duas ondas estão exactamente em oposição de fase (ver também Interferência).

Fermião Uma partícula que obedece ao princípio da exclusão de Pauli, que diz que dois fermiões não podem estar no mesmo estado quântico (ver também Bosão).

Força Um levantamento, puxão ou empurrão, que provoca uma mudança no movimento de qualquer coisa. A 2.ª lei de Newton define uma força como sendo proporcional à aceleração que ela produz.

Fotão Luz a manifestar-se como uma partícula.

Frente de onda A linha que o pico de uma onda desenha.

Frequência O ritmo a que os picos de uma onda passam num dado ponto.

Função de onda Na teoria quântica, é uma função matemática que descreve todas as características de uma partícula ou de um corpo, incluindo a probabilidade de que tenha certas propriedades ou esteja num dado local.

Galáxia Um grupo ou nuvem de milhões de estrelas, unidas pela gravidade. A nossa Via Láctea é uma galáxia espiral.

Gás Uma nuvem de átomos ou moléculas soltos. Os gases não têm limites, mas podem ser confinados num recipiente.

Gravidade Uma força fundamental através da qual as massas se atraem entre si. A gravidade é descrita pela teoria da relatividade geral de Einstein.

Hipótese dos muitos mundos Na teoria quântica e na cosmologia, é a ideia de que existem muitos universos paralelos que divergem uns dos outros à medida que os acontecimentos se desenrolam, e que nós só estamos num único ramo dessas divergências num dado instante.

Idade do Universo ver Universo

Inércia ver Massa

Interferência A combinação de ondas de fases diferentes que podem reforçar-se (se estiverem em fase) ou cancelar-se (se estiverem em oposição de fase).

Isótopo Um elemento químico que existe em formas diferentes, com o mesmo número de prótons mas com um número diferente de neutrões no seu núcleo, e portanto com massas atómicas diferentes.

Massa Uma propriedade que é equivalente ao número de átomos, ou à quantidade de energia, que algo contém. A inércia é uma ideia parecida, que descreve a massa em termos da sua resistência ao movimento, de tal forma que um objecto pesado (com maior massa) é mais difícil de mover.

Métrica do espaço-tempo Espaço geométrico combinado com o tempo numa única função matemática da relatividade geral. Muitas vezes visualizada como uma folha de borracha.

Momento O produto da massa pela velocidade que exprime o quão difícil é parar algo que esteja em movimento.

Núcleo O pedaço duro e central do átomo, feito de prótons e neutrões, mantido unido pela força nuclear forte.

Observador Na teoria quântica, um observador é alguém que executa uma experiência e mede o seu resultado.

Pressão Definida como força por unidade de área. A pressão de um gás é a força exercida pelos seus átomos ou moléculas sobre a superfície interna do seu recipiente.

Quanta As subunidades de energia mais pequenas, usadas pela teoria quântica.

Quark Uma partícula fundamental, três das quais se combinam entre si para fazer prótons e neutrões. As formas de matéria feitas de quarks chamam-se bariões.

Qubits Bits quânticos. Semelhantes aos «bits» dos computadores, mas incluindo informação quântica.

Radiação cósmica de fundo de microondas Um brilho de microondas muito ténue, que preenche o céu. É o brilho residual do *big bang*, tendo arrefecido desde então e sofrido um desvio para o vermelho, até ficar com uma temperatura de 3 Kelvins.

Radiação de corpo negro Brilho luminoso emitido por um objecto negro a uma temperatura específica, e que tem um espectro característico.

Reflexão A inversão de uma onda quando ela atinge uma superfície, como acontece para um raio de luz a chocar contra um espelho.

Refracção «Dobragem» de ondas, regra geral devida a elas abrandarem a sua velocidade ao passarem através de um meio, como a luz através de um prisma.

Supernova A explosão de uma estrela acima de uma certa massa quando chega ao fim da sua vida.

Tensão Força por unidade de área, sentida internamente por um sólido devido a uma carga que lhe está a ser aplicada.

Turbulência Quando os fluidos se escoam demasiado depressa eles tornam-se instáveis e turbulentos, originando remoinhos e correntes.

Universo A totalidade do espaço e do tempo. Por definição inclui tudo, mas alguns físicos falam de universos paralelos, separados do nosso. O nosso universo tem cerca de 14 mil milhões de anos de idade, determinada a partir da sua velocidade de expansão e das idades das estrelas.

Vácuo Um espaço que não contenha átomos é um vácuo. Não existe nenhum na natureza – até o espaço sideral tem uns quantos átomos por centímetro cúbico –, mas os físicos aproximam-se muito do vácuo perfeito em laboratório.

Velocidade A velocidade corresponde a movimento numa dada direcção. É a distância nessa direcção que um objecto percorrer num dado tempo.

Índice remissivo

A

aceleração 9-10, 16, 18, 21, 164, 167, 195, 204
 aceleradores de partículas 127, 133, 147, 154
 aerodinâmica 52-5
 água 6, 19, 24, 41, 52-5, 60-1, 64-6, 81-3, 137, 153, 202
 Airy, George, anéis de Airy 73-4
 altitude 32, 35, 42
 antimatéria 132-5, 144
 arco-íris 11, 56, 58-9
 armas nucleares 106, 136, 138-9, 150
 átomos 204
 campos magnéticos 91-147
 fissão 136-9, 141
 força nuclear forte 131, 136, 140-1, 145-6, 152, 200, 205
 fusão nuclear 140-3, 181
 níveis de energia 100-2, 109
 partículas subatômicas 7, 80, 106, 112, 145, 147-8, 150-1, 188, 190, 195, 201
 princípio de exclusão 120-3, 126, 170, 204

B

bárions 146, 189, 191, 205
 Bernoulli, Daniel 51
 equação de Bernoulli 52-5
big bang 42, 94, 135, 143, 177, 179, 180-3, 185-7, 194, 203, 205
 Bohr, Niels 10-3, 108-11, 114, 118, 123, 135, 137, 145
 bóson de Higgs 147, 152-5
 Bose, Satyendranath 123, 126
 bósons 123, 126-7, 135, 146, 150-2, 153-5, 204
 Bragg, William 69, 103
 lei de Bragg 68-71, 72
 Broglie, Louis-Victor de 97, 99-100, 103
bungee jumping 29-30
 buracos de verme 164, 167, 171
 buracos negros 19, 123, 164-7, 168-71, 183, 192

C

calor
 e cor 92-5
 e luz 92-5
 energia 22
 termodinâmica 36-8
 clima 48-51, 55

comprimento de onda 58-9, 61, 69-70, 73-4, 94, 101, 179

cor

da luz 11, 38
 e calor 92-4,
 teoria de Newton 56-9

D

desvio para o vermelho 79, 94, 175, 178-9, 181, 183, 186, 204
 difração 62, 68-9, 72-5, 98-9, 204
 difusão 46
 Dirac, Paul 91, 114, 132-4
 Doppler, Christian 77
 efeito Doppler 76-9, 178, 204
 dupla hélice do DNA 68, 70-1

E

efeito borboleta 48-50
 efeito fotoelétrico 45, 96-9
 Einstein, Albert 98
 condensados de Bose-Einstein 126
 constante cosmológica 192-5
 energia e massa 5, 22
 luz 22, 96-9
 paradoxo EPR 114-19
 teorias da relatividade 122, 160-3, 164-7, 184, 191-2
 electricidade 204
 circuitos 24, 26, 83, 86-7
 condensadores 86-7
 corrente 26, 81, 82-5, 87, 124, 128, 142
 efeito fotoelétrico 45, 96-9, 108
 energia nuclear 136-8
 estática 80
 fusão nuclear 140-3
 isolantes 81-2, 127
 lei de Ohm 80-3
 regra da mão direita 84-7
 resistência 82-3, 124, 127
 semicondutores 82, 99
 supercondutividade 124-7
 tensão 82-3, 87
 transformadores 85, 87, 127

elétrons

antimatéria 132-5, 144
 carga 34, 80-2, 84-7
 efeito fotoelétrico 96-9, 108
 equação de ondas 100-3
 léptons 145-7, 149
 pares de Cooper 125-7
 trabalho de Rutherford 109, 128-31
 eletromagnetismo
 indução 84-7, 89, 91
 ondas 20, 22, 57-8, 67, 71, 88-90, 100, 105
 radiação 95
 energia 204
 conservação 20-3, 39, 54, 85
 entropia 36-9, 204

ondas 60-3

energia cinética 20, 21-2, 25, 34, 98
 energia elástica 22, 28-31
 energia escura 35, 183, 189, 191-2, 194-5, 200, 202-3
 entropia 36-9, 95, 204
 equações de Navier-Stokes 55
 esforço/tensão 29-30, 205
 estrelas
 «congeladas» 170-1
 anã branca 122, 170
 cor 92-3
 de neutrões 120, 122-3, 170, 199
 fusão nuclear 140-3, 181
 ondas gravitacionais 166
 paradoxo de Olbers 172-5
 Via Láctea 163, 171, 173, 177-8, 182

F

Faraday, Michael 82, 84-91
 faróis 75, 84, 86
 Fermat, Pierre de 66, 67, 151
 Fermi, Enrico 138
 paradoxo de Fermi 196-9
 férmions 121-2, 204
 Feynman, Richard 148, 150
 diagramas de Feynman 148-51
 física de partículas
 bóson de Higgs 147, 152-5
 diagramas de Feynman 148-51
 modelo padrão 144-7, 154-5
 teoria de cordas 156-9, 183, 203
 fissão nuclear 136-9
 Fleming, John Ambrose,
 regra da mão direita 84-7
 fluidos
 equação de Bernoulli 52-5
 equação de Navier-Stokes 55
 superfluidos 125, 127, 150
 teoria do caos 48-51
 fluxo sanguíneo 53, 78
 força electromotriz 85
 forças 204
 campo de Higgs 152-4
 elástica 22, 28-30
 electrofraca 151, 153, 182
 electromagnética 89-90, 131, 149, 153
 electromotriz 85
 leis de Newton 8-11, 16-9, 34
 nuclear forte 128-9, 131, 136, 140-1, 145-6, 200
 nuclear fraca 146, 149, 150-1, 153
 fótons 96-9, 102, 105, 110-11, 119, 123, 130, 135, 144-7, 149, 152-3, 163, 167, 182, 204
 fractais 44-7, 50-1

Franklin, Benjamin 81-2, 88
 frequência, ondas 61, 76, 101, 204
 fusão fria 142
 fusão nuclear 140-3, 145, 181

G

Galileu Galilei 4, 6, 8-10, 20-1, 24
 gás 204
 domínio de Maxwell 39
 leis dos gases ideais 32-5
 líquido 42
 glúons 146-7, 152, 181
 Goethe, Johann Wolfgang von 57, 59
 gravitação
 buracos negros 19, 123, 166-7, 168-71
 energia escura 183, 189, 192, 194-5, 200-2
 energia potencial 21, 25
 experiência de Galileu 10
 gravitão 147
 lei de Newton 16-9
 matéria escura 188-91, 194
 ondas 166
 princípio de Mach 4-7
 relatividade geral 17, 98, 164-7, 169, 180, 184, 192, 205
 teoria do caos 48-51

H

hadrões 145
 Heisenberg, Werner 106
 princípio da incerteza 104-7, 108-10, 117, 155
 hidrogénio 33, 101-2, 130, 133, 140-3, 181-3, 191
 Hooke, Robert 29, 31
 lei de Hooke 28-31, 204
 Huygens, Christian 11, 61
 princípio de Huygens 60-3, 68

I

inércia 4-9, 205
 interferência 70, 73-5, 98-9, 205
 interpretação de Copenhaga 108-11, 112-4, 116-7

K

Kelvin, Lord 43
 escala de Kelvin 40-1
 Kepler, Johannes 13
 leis de Kepler 12-5

L

lei de Gauss 90-1
 lei de Hubble 176-9, 181, 193
 lei de Ohm 80-3
 lei de Snell 64-7
 Leibniz, Gottfried 4, 6, 20, 22
 lentes 64, 66, 72-3, 75, 81
 léptons 145-7, 149
 longitude 29, 30-1, 61
 Lorenz, Edward 49-50, 162

- luz
difração 62, 68-9, 72-5, 97, 99, 204
dobragem da 190, 205
dualidade onda-partícula 97, 103, 105, 156, 204
e cor 56-9, 93
efeito fotoelétrico 96-9
infravermelho 59, 175, 178
meio gasoso 43
reflexão 66, 205
refracção 63, 64-7, 205
relatividade restrita 98, 160-4
ultravioleta 59, 93-7, 150
velocidade da 22, 65, 75, 97, 118, 160-5
- M**
Mach, Ernst 7
princípio de Mach 4-7, 134, 161
MACHOS 188-91
magnetismo 88, 90-1, 204
ver também electromagnetismo
massa 5-7, 9-11, 17-19, 21-3, 78, 129-2, 152-6, 163, 169, 205
matéria escura 188-91, 194
Maxwell, James Clerk 90
demónio de Maxwell 38-9
equações de Maxwell 88-91, 97
mecânica quântica
antimatéria 132-5, 144
condensados de Bose-Einstein 126
criptografia 116-9
desenvolvimento da 35, 75, 98, 100-3, 104-7, 108-11, 114, 122, 134, 151
e electromagnetismo 91
e relatividade 132, 134
electrodinâmica quântica (QED) 150-1
entrelaçamento 116-9, 204
gato de Schrödinger 112-5, 118
hipótese dos muitos mundos 115, 202, 205
interpretação de Copenhaga 108-11, 112-5, 116-7
mecânica de matrizes 106-8
paradoxo EPR 116-9
princípio da exclusão 120-3, 126, 170
princípio da incerteza 104-7, 108-10, 117, 119, 155
teoria das cordas 156-9, 183, 203
teorias da gravidade 167
mesões 131, 146
meta-materiais 66-7
métrica do espaço-tempo 165-6
microondas 59, 67, 89
cósmicas 42, 93-4, 179-82, 185-7, 193, 205
- mole 32-3
momento 23, 34, 54, 110, 116
movimento
Browniano 44-7, 98
efeito de Doppler 76-9, 204
harmónico simples 24-7
leis de Newton 8-11
perpétuo 36, 38-9, 124
princípio de Mach 4-7, 134, 161
relatividade restrita 160-3
teoria do caos 48-51
movimento Browniano 44-7, 98
muões 146
- N**
neutrino 122, 135, 142-3, 144-7, 155, 182, 191
neutrões 80, 99, 105, 120-3, 128-31, 136-9, 140-3, 144-7, 181-2
Newton, Isaac 5-6, 11, 31
gravitação 16-19
movimento 8-11
teoria da cor 56-9
núcleo 128-31, 136-7, 144-5, 205
nucleões 131, 141
número de Avogadro 32-3
- O**
ondas
de luz 57-9, 72, 75, 89, 95, 97, 170
difração 62, 68-9, 72-5, 97, 204
dualidade onda-partícula 75, 97, 99, 103, 105, 109, 114, 156, 204
efeito Doppler 76-9, 178
electromagnéticas 20, 57-9, 67, 71, 88-91, 100, 105-6, 108, 130, 146, 160
equação de Schrödinger 100-3, 106, 108, 111, 121
gravitacionais 166
interferência 70, 72-5, 97-111, 205
princípio de Huygens 60-3, 68
refracção 64-7
ondas de rádio 22, 59, 89, 175, 198-9
- P**
paradoxo de Olbers 172-5
Pauli, Wolfgang 122
princípio de exclusão 120-3, 126, 170
pêndulos 19, 25-6, 30-1
Planck, Max 92-5, 96-7, 100-1, 114, 163
planetas
leis de Kepler 12-15, 17
Neptuno 15, 18-19, 51
Saturno 15, 61, 63, 197
teoria do caos 51
Podolsky, Boris 116, 118
- pólen 44-5
positrões 71, 132-4, 149, 182
pressão 11, 32-5, 41, 52-5, 125, 205
princípio da incerteza 104-7, 108, 110, 117, 119, 155
prótons 80, 99, 101, 120-3, 128-31, 132-3, 135-6, 140-3, 144-6, 150, 154, 181-2
pulsares 166, 199
- Q**
quanta 93-5, 96-8, 101-2, 205
quarks 144-7, 149-52, 155-6, 181-2, 205
- R**
radiação 130, 138, 170
radiação alfa 129-30
radiação beta 130, 145, 150
radiação do corpo negro 43, 92-5, 108, 205
raios gama 59, 89, 105, 130
raios X 59, 68-71, 87, 171
reflexão 65-6, 204
refracção 64-7, 205
relâmpago 80-3
relógios 24, 26, 28, 30-1, 61
ressonância 27, 71
Röntgen, Wilhelm 69-71
Rosen, Nathan 116-9
Rutherford, Ernest 109, 128-31
- S**
Schrödinger, Erwin 111, 114
equação das ondas 100-3, 106, 108, 111, 121
gato de Schrödinger 112-5, 118
semicondutores 81-2, 99
som 7, 53, 76-9
supercondutividade 43, 124-7
superfluidos 125, 127, 150
Szilárd, Léo 138-9
- T**
taus 146
telemóveis 3, 89, 91
telescópio 78, 167, 172, 174-9
teletransporte 116-7, 119
temperatura
ver também calor
do universo 42, 94, 186
supercondutividade 124, 127
termodinâmica 36-9
zero absoluto 40-3, 124, 126
tempo 160-3, 164-7, 168-71
teoria das cordas 156-9, 183, 203
teoria do caos 48-51
teoria ergódica 51
teoria-M 158, 183, 203
teorias da relatividade
geral 98, 164-7, 169, 180, 184, 192
restrita 98, 160-3, 164
- teoria quântica 132, 134
termodinâmica 36-9, 95
Terra, rotação 24-5
theremin 26
tubo de venturi 54
- U**
universo
ver também planetas; estrelas
antimatéria 134-5
big bang 42, 79, 94, 135, 143, 179, 180-3, 185-7, 190-2, 194, 203
constante cosmológica 192-5
efeito Doppler 76-9, 178, 204
energia escura 35, 183, 190-1, 192, 194-5, 200, 202-3
entropia 37-8
equação de Drake 196, 198
espaço-tempo 165-8
estado estacionário 180, 183, 192
expansão 176-9, 180-3, 184-7, 190, 192-5
matéria escura 188-91
paradoxo de Olbers 172-5
paralelo 115, 202
princípio antrópico 200-3
princípio de Mach 4-7, 134
procura por vida 196-9
radiação de microondas 179, 180-3, 185-7, 193, 205
raios de luz 184-7
temperatura 41-3, 94
teoria do caos 51
- urânio 136-9
- V**
vácuo 35, 65, 88-9, 194, 205
velocidade
da luz 11, 22, 65, 74-5, 88, 90, 97-8, 118, 160-3, 165, 168, 186-7, 198
do som 7, 161
leis do movimento 8-9
velocidade, e momento 23
viagens espaciais
dilação do tempo 161-3
satélite COBE 94
sonda de microondas 185
sonda de Titã 62-3, 197
telescópio Hubble 167, 178
vibrações 20-3, 24-7, 71, 126-7, 156-9
vidro 64-7, 74-5
- W**
WIMPs 146, 167, 171
- Y**
Young, Thomas 22, 75
- Z**
zero absoluto 40-3, 124, 126, 183



Título: *50 Ideias de Física Que Precisa mesmo de Saber*
Título original: *50 Physics Ideas You really Need to Know*
© Joanne Baker, 2007
Published by arrangement with Quercus Publishing PLC (UK)
© Publicações Dom Quixote, 2011
Revisão: Jorge Silva

Adaptação da capa: Transfigura.design
Paginação: www.8551120.com

ISBN: 9789722048668
Reservados todos os direitos

Publicações D. Quixote
Uma editora do Grupo Leya
Rua Cidade de Córdova, n.º 2
2610-038 Alfragide – Portugal
www.dquixote.pt
www.leya.com